

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



Universidad
Carlos III de Madrid

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN: SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES RHEED**

Álvaro Ramiro González

Madrid, Junio 2015

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



Universidad
Carlos III de Madrid

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN: SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES RHEED**

Álvaro Ramiro González

Tutor

Belén Ruiz Mezcua

Director

Antonio Martí Vega

Acto de defensa y lectura del proyecto final de carrera en
Madrid, el día 23 de Junio de 2015.

*There is no doubt that some plant food,
such as oatmeal, is more economical than meat,
and superior to it in regard to both mechanical
and mental performance.
Such food, moreover, taxes our digestive organs
decidedly less, and, in making us
more contented and sociable,
produces an amount of good
difficult to estimate.*

Nikola Tesla.

Agradecimientos

A mis padres, Ildefonso y Blanca, por darme la vida y su ininterrumpido cariño y soporte durante tantos años.

A mi hermano Iñigo, por quien profeso una extraordinaria admiración y ha sido una pieza básica en el camino a la realización de este proyecto.

A mi compañera Alba, por su inestimable ayuda y apoyo tanto en la realización de este proyecto como en el resto de proyectos y aventuras que constituyen la vida.

A mis compañeros de la Universidad Roberto, Fisac, Jorge, Chema, Almudena, Ana y otros tantos que me dejó, por compartir esos años de formación conmigo.

A mis compañeros del Instituto de Energía Solar, Manu, Irene y Esther.

A Belén Ruiz, por la ayuda prestada y la orientación en la redacción de la memoria de este proyecto.

A Antonio Martí, excepcional científico, sin el cual este proyecto no hubiera sido posible.

Resumen

Este proyecto ha sido desarrollado dentro de una colaboración con el Instituto de Energía Solar (IES) de la Universidad Politécnica de Madrid. En concreto, participando en el trabajo de investigación que está siendo realizado con un reactor de epitaxia molecular (MBE, del inglés ‘Molecular Beam Epitaxy’).

El crecimiento por MBE es una técnica compleja que permite el depósito de capas monoatómicas sobre la superficie de un sustrato cristalino. En el IES se cuenta con un reactor MBE para la investigación y desarrollo de células solares de banda intermedia (IBSC, del inglés ‘Intermediate Band Solar Cells’), un nuevo tipo de células de alta eficiencia. Para disponer de un mayor control sobre los procesos de crecimiento, los reactores MBE llevan incorporados un sistema de caracterización conocido como RHEED. Este sistema consiste en la formación de patrones en una pantalla fotoluminiscente que vienen determinados por la reflexión de un rayo de electrones disparados sobre la superficie de una oblea. El manejo adecuado del reactor precisa de un fino ajuste de una serie de parámetros. En este proyecto se ha desarrollado una herramienta que asiste al operario del reactor en una adecuada calibración de dichos parámetros, permitiendo un estudio en profundidad de las condiciones de los procesos de crecimiento epitaxial.

Para conseguir dicho objetivo se ha diseñado un equipo de adquisición de imágenes y se han desarrollado varios programas con las funciones de grabación y análisis de dichas imágenes. El equipo de adquisición está formado por una cámara, una lente y una tarjeta capturadora integrada en un ordenador. Los programas han sido implementados en las plataformas de desarrollo LabView y Matlab.

El sistema diseñado está siendo en la actualidad utilizado para los propósitos que se fijaron. Gracias a su uso es posible un mejor control de los procesos de crecimiento epitaxial y supone un punto inicial sobre el que basar un conjunto muy amplio de posibles estudios en profundidad de la fabricación de células solares.

Índice general

Índice general	II
Lista de figuras	VI
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	1
1.2. Estructura del documento	2
2. Estado de la cuestión	5
2.1. MBE	5
2.1.1. MBE del IES	7
2.2. RHEED	8
2.2.1. Oscilaciones del punto de reflexión especular del RHEED . . .	9
3. Metodología	13
3.1. Análisis de requisitos	13
3.2. Casos de uso	14
3.3. Herramientas	16
4. Diseño del sistema	19
4.1. Hardware	19
4.1.1. La cámara	19

4.1.2.	PC y tarjeta de adquisición	21
4.1.3.	Montaje	22
4.2.	Software	23
4.2.1.	Rheed capture	24
4.2.2.	Create video	31
4.2.3.	MLRC	35
4.3.	Tratamiento de señal	41
4.3.1.	Obtención de la variación de intensidades con el tiempo	41
4.3.2.	Estimación de la frecuencia	42
4.3.3.	Cálculo de la tasa de crecimiento	45
5.	Experimentación y resultados	49
5.1.	Medida de la tasa de crecimiento	49
5.2.	Medida de la temperatura de desoxidación de una oblea	52
5.3.	Calibración del mínimo flujo de arsénico	53
5.4.	Crecimiento de puntos cuánticos	55
6.	Prototipo	59
6.1.	Uso de ‘Rheed capture’	59
6.1.1.	Grabación de imágenes	60
6.2.	Uso de MLRC	61
6.2.1.	Selección de archivos	61
6.2.2.	Selección del área de estudio y análisis de intensidades	62
6.2.3.	Ajuste de rango temporal de estudio	62
6.2.4.	Análisis y presentación de resultados	64

7. Conclusiones y futuros trabajos	67
7.1. Conclusiones	67
7.2. Futuros trabajos	69
7.2.1. Medida de la tasa de depósito en tiempo real	69
7.2.2. Reconstrucción en 2D y 3D de la oblea	70
7.2.3. Automatización de la medida de puntos cuánticos	70
A. Presupuesto	71
Bibliografía	75

Lista de figuras

2.1.	Esquema de un MBE.	6
2.2.	Fotografía del reactor MBE instalado en el Instituto de Energía Solar.	7
2.3.	A la izquierda, el proceso de reflexión de los electrones difractados por los átomos de la superficie de la muestra. A la derecha, una fotografía tomada de la pantalla del RHEED durante un crecimiento de una oblea de GaAs (arseniuro de galio). Se puede apreciar como la reflexión de los electrones forma una serie de patrones.	8
2.4.	Imágenes grabadas de un crecimiento de GaAs con el programa ‘Rheed capture’ desarrollado en este proyecto. Se ha aplicado un mapa de color Jet para facilitar la apreciación de los diferentes niveles de intensidad. A la izquierda, el punto de reflexión especular se encuentra en uno de sus máximos de intensidad (capa completada). A la derecha, en uno de sus mínimos (capa a la mitad de su formación).	10
2.5.	Esquema adaptado de [Neave et al., 1983] representando la relación entre el porcentaje de monocapa formada y la intensidad apreciable en el punto de reflexión especular.	11
2.6.	Gráfica tomada de [Neave et al., 1983] mostrando la variación de la intensidad del punto de reflexión especular en un crecimiento de GaAs.	11
3.1.	Diagrama de casos de uso para la captura y almacenamiento de imágenes.	15
3.2.	Diagrama de casos de uso para el análisis de datos.	16
4.1.	Diagrama de bloques del sistema de caracterización diseñado.	20
4.2.	Cámara Basler acA2000-340km con objetivo Pentax C32500KP.	21
4.3.	Mecanismo de sujeción para la cámara que se construyó inicialmente.	22
4.4.	Montaje final del equipo de captura de imágenes.	23

Lista de figuras

4.5. Interfaz gráfica de usuario del programa Rheed capture.	25
4.6. Diagrama de flujo de Rheed capture.	28
4.7. Bloques 1 y 2 de la programación Labview de Rheed capture.	29
4.8. Bloques 3 y 4 de la programación Labview de Rheed capture.	30
4.9. Interfaz gráfica del programa Create video. Los campos <i>Fps</i> y <i>Bits por píxel</i> deben ser configurados antes de la ejecución del programa. .	31
4.10. Diagrama de flujo del programa Create video mostrando los tres bloques en los que se dividió.	33
4.11. Bloques de selección de carpeta y codificación de vídeo.	34
4.12. Bloque de reproducción del vídeo creado.	34
4.13. Vista inicial de la interfaz gráfica del programa de análisis MLRC. . .	35
4.14. Área de propiedades de la interfaz gráfica del programa MLRC. . . .	36
4.15. Área de manejo de datos de la interfaz gráfica del programa MLRC. .	37
4.16. Diagrama de flujo del botón Load Images.	38
4.17. Área de estudio de señal de la interfaz gráfica del programa MLRC. .	39
4.18. Diagrama de flujo del botón Analyze data.	40
4.19. Área de resultados de la interfaz gráfica del programa MLRC.	40
4.20. A la izquierda, una imagen original del patrón RHEED. A la derecha, la misma imagen después de ser aplicado un filtro de mediana.	42
4.21. Representación de la densidad espectral de potencia de la señal. . . .	43
4.22. A la izquierda, la señal original. A la derecha, la señal después de aplicarle un filtro paso bajo de orden 7.	43
4.23. Representación de los errores producidos usando el error cuadrático medio y el error absoluto al ir cambiando la fase de la señal estimada. .	44
4.24. Representación del error cuadrático medio cometido con 3 desfases diferentes al ir variando la frecuencia.	45

4.25. Superposición de la señal original y la señal sinusoidal con la frecuencia calculada.	46
4.26. Representación de la constante de red cúbica (d) y período monocapa (a) del material GaAs.	47
5.1. Fotografía del interior de la cámara de crecimiento del MBE durante el experimento. Dentro se encuentra una oblea de 3 pulgadas de GaAs.	50
5.2. Cuadro de resultados del programa MLRC donde se muestra la medida de la tasa de depósito en nanómetros por hora y capas por segundo.	51
5.3. A la izquierda, fotografía tomada de una oblea de tamaño 10x10 mm dentro de la cámara de crecimiento del MBE. A la derecha, imagen capturada con el programa Rheed capture del patrón RHEED generado por la misma oblea.	51
5.4. Evolución de la temperatura de la oblea durante el proceso de desoxidación.	53
5.5. Imágenes capturadas de la pantalla del RHEED a diferentes temperaturas de una oblea de GaAs durante su proceso de desoxidación.	54
5.6. Imágenes capturadas mostrando la evolución de los patrones con la reducción del flujo de arsénico.	55
5.7. Imágenes capturadas mostrando la evolución de formación de islas de InGaAs.	57
6.1. Opciones de configuración de la sesión de captura.	60
6.2. Zona de configuración de la grabación de imágenes. A la izquierda la calidad de la imagen, a la derecha el botón para comenzar y detener la grabación.	60
6.3. Ventana de selección de la carpeta contenedora de las imágenes a estudiar.	62
6.4. Pantalla de selección de la ventana de estudio.	63
6.5. Obtención de la curva de análisis de intensidades.	63
6.6. El gráfico inferior muestra la señal original en el rango temporal que se ha elegido para el estudio.	65

6.7. El gráfico inferior muestra la superposición de la señal estimada en rojo sobre la señal original en azul. Los resultados son presentados en el recuadro inferior. 65

Introducción

1.1. Motivación y objetivos

Este proyecto final de carrera se desarrolla en colaboración con el grupo de Silicio y Estudios Fundamentales del IES de la Universidad Politécnica de Madrid. El IES es un centro de investigación dedicado a la energía solar fotovoltaica desde su creación en 1979 y comprende seis grupos de investigación que centran sus estudios en campos que van desde estudios fundamentales de semiconductores hasta el desarrollo de sistemas fotovoltaicos. El grupo de Estudios Fundamentales dirigido por el profesor Antonio Luque realiza sus estudios en la línea de investigación y desarrollo de células de banda intermedia para intentar elevar la eficiencia de las células convencionales [Luque and Martí, 1997].

Una de las razones que retrasa el progreso en las investigaciones de un centro de investigación es el tiempo de espera a la hora de llevar a cabo los experimentos para intentar probar sus postulados. En el caso del IES, para poder disponer de los recursos necesarios para la fabricación y medida de dispositivos se hizo el esfuerzo de adquirir uno de los reactores MBE más modernos del mercado.

Cada reactor requiere unos valores distintos para sus parámetros de funcionamiento. Entre estos parámetros se encuentra la temperatura de las celdas de evaporación, los flujos necesarios de materiales para establecer el ritmo de crecimiento de un semiconductor, los parámetros de voltaje y corriente de las celdas que contienen los materiales, etc. Para un correcto funcionamiento del MBE, el usuario (que en el ámbito que atañe se conoce como ‘crecedor’) debe haber ajustado esos parámetros a la hora de realizar crecimientos.

Este proyecto de fin de carrera no se enmarca en un solo campo de investigación, sino que requiere la incursión en un desarrollo donde intervienen elementos hardware, software, conocimiento de fundamentos de física y la aplicación de procedimientos

1. Introducción

científicos de experimentación. Todo esto significaba una gran oportunidad para complementar mi formación como ingeniero.

Los objetivos que se plantean con la realización de este proyecto de fin de carrera se enumeran a continuación:

- La familiarización con diferentes procesos físicos que se dan en un reactor MBE.
- La identificación y el desarrollo de una solución que facilite la calibración de los parámetros de funcionamiento de un reactor MBE.
- La realización de diferentes experimentos para comprobar la validez del sistema implementado en el proyecto.
- La creación de un pequeño manual que permita un fácil uso de los programas desarrollados en el proyecto.

En resumen, con la consecución de todos los objetivos anteriores se pretende la implantación en el IES de un sistema de ayuda al operario del MBE que asista en la correcta calibración del reactor. Este sistema servirá además como herramienta de análisis de las células crecidas, permitiendo la apertura de nuevas líneas de investigación.

1.2. Estructura del documento

El trabajo realizado se presenta a lo largo de seis capítulos y un anexo con su correspondiente bibliografía.

En el Capítulo 1 se exponen la motivación y los objetivos pensados al iniciar el proyecto y se presenta una descripción de la forma en la que se ha estructurado el documento.

En el Capítulo 2 se hace una introducción de los procesos MBE y la herramienta RHEED para su monitorización con el objetivo de familiarizar al lector con esta metodología.

En el Capítulo 3 se realiza un análisis de los requisitos y los posibles casos de uso requeridos por el sistema.

En el Capítulo 4 se aborda el diseño sistema realizado, describiendo sus partes hardware, software y el tratamiento de datos realizado.

Seguidamente, se procede, en el Capítulo 5, a relatar diferentes estudios y experimentos haciendo uso del sistema desarrollado para mostrar varias de sus aplicaciones.

El Capítulo 6 consiste en un pequeño manual de ejemplo de los programas Rheed Capture y MLRC para el cálculo de la tasa de depósito de un crecimiento epitaxial, explicando paso a paso el uso del sistema para proporcionar una mejor comprensión al usuario.

En el Capítulo 7 se exponen las conclusiones y se proponen varias ideas como futuras líneas de investigación.

Por último, en el Anexo A se lleva a cabo el cálculo del presupuesto del trabajo desarrollado.

La bibliografía recoge los principales documentos de referencia consultados que han sido utilizados durante el desarrollo de este proyecto de fin de carrera.

Estado de la cuestión

Este capítulo servirá al lector como introducción para familiarizarse con herramientas y conceptos usados en la fabricación de células solares. El capítulo se divide en dos partes. En la primera se habla del método de fabricación MBE en general y del reactor en particular que se dispone en las instalaciones del IES. La segunda parte aborda un mecanismo de control de crecimientos por MBE denominado RHEED y describe la relación existente entre su patrón más característico y la velocidad de crecimiento.

2.1. MBE

El MBE es una técnica utilizada para el depósito de monocristales sobre la superficie de un sustrato cristalino. Este procedimiento fue inventado al final de los años 60 en los laboratorios Bell por J. R. Arthur and Alfred Y. Cho [Cho and Arthur, 1975] y perfeccionado durante las décadas de los 70 y 80.

Las aplicaciones de crecimiento por MBE han ido en aumento desde su aparición, permitiendo la fabricación de dispositivos electrónicos y fotónicos extraordinariamente avanzados. El control extremo del espesor en los métodos epitaxiales actuales permite el estudio de fenómenos químicos y físicos como el transporte iónico, la formación de picaduras en la corrosión en metales, la conductividad en películas delgadas y la medición de la velocidad de reacciones, entre otros.

En el caso del IES, el reactor MBE se utiliza para la fabricación de células solares de banda intermedia. Las células solares de banda intermedia son un tipo de células de alta eficiencia cuyo concepto se basa en el aprovechamiento de los fotones con

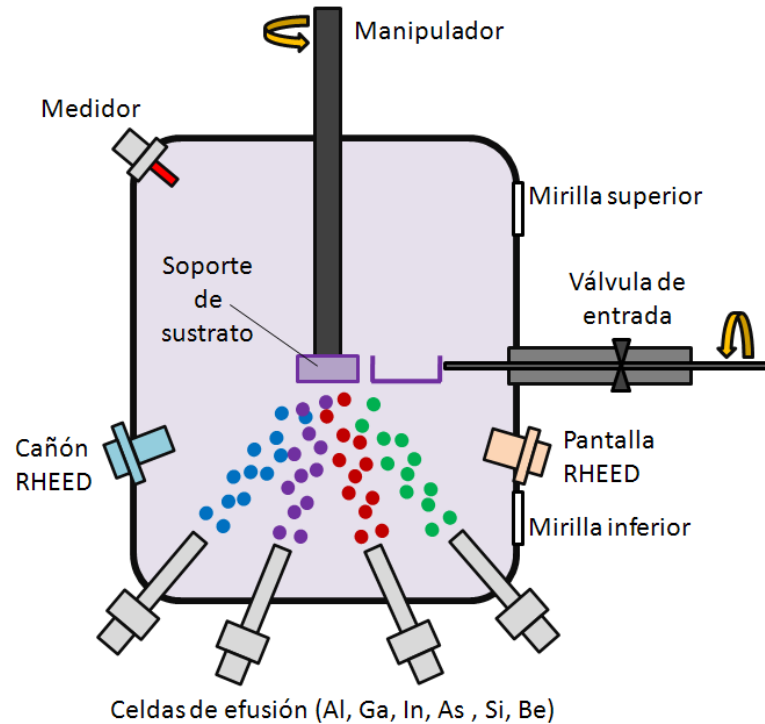


Figura 2.1: Esquema de un MBE.

energías menores al 'gap'¹. El lector interesado en este tema puede acudir a las referencias [Luque and Martí, 2001], [Martí et al., 2001].

Se dispone de diversas variables que pueden ser ajustadas y monitorizadas para mejorar la calidad del procedimiento. Éstas se listan a continuación.

- El flujo de partículas que llega al sustrato.
- La temperatura del sustrato.
- La temperatura de los elementos fuentes.

El procedimiento consiste en calentar ciertos elementos sólidos en un tipo de celdas denominadas celdas de efusión Knudsen (ver Figura 2.1) hasta conseguir que se evaporen o sublimen lentamente. Parte de los átomos desprendidos incidirán sobre la muestra, la cual dispone de un sistema de calentamiento para elevar el sustrato a la temperatura necesaria (típicamente 580°C para una oblea de arseniuro de galio) para el depósito de partículas y un sistema rotatorio para garantizar la homogeneidad del

¹El 'gap' es la energía necesaria para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción.

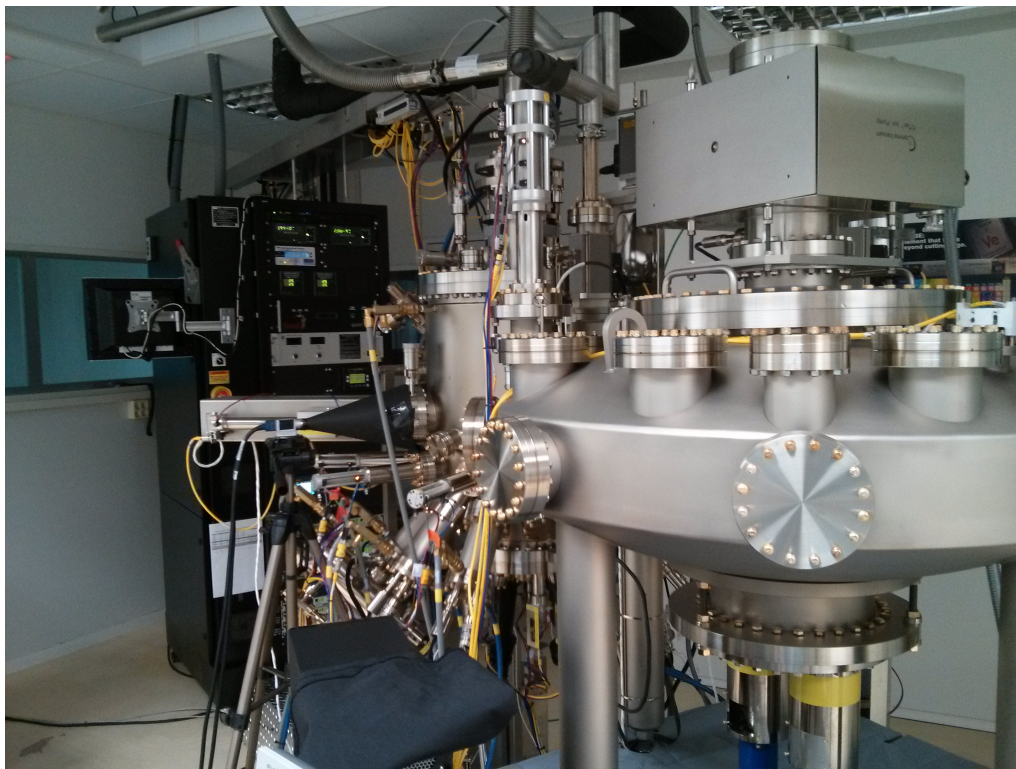


Figura 2.2: Fotografía del reactor MBE instalado en el Instituto de Energía Solar.

crecimiento. La temperatura a la que se han de llevar los elementos depende de sus temperaturas de fusión y sublimación y del flujo requerido para el crecimiento.

El depósito por MBE se da en unas condiciones de vacío ultra alto (en el rango de 10^{-10} - 10^{-11} Torr) con el objetivo de que los átomos no interaccionen entre ellos hasta que lleguen a la muestra. Una vez allí estos átomos se combinan formando sucesivas capas cristalinas. Las principales características de este tipo de crecimiento son la baja tasa de depósito (típicamente de menos de $3 \mu\text{m/h}$) y la alta pureza de los materiales obtenidos.

Para una correcta estimación de los parámetros del crecimiento por MBE se vuelve indispensable una herramienta que permita calibrar el reactor y para ello los reactores MBE vienen complementados con una sistema de monitorización de la reconstrucción de la superficie del sustrato. Esta técnica, conocida como RHEED, se presenta en la sección 2.2.

2.1.1. MBE del IES

La Figura 2.2 muestra una fotografía del reactor MBE que se encuentra instalado en las instalaciones del IES. Se trata en concreto del modelo Gen 10 del fabricante

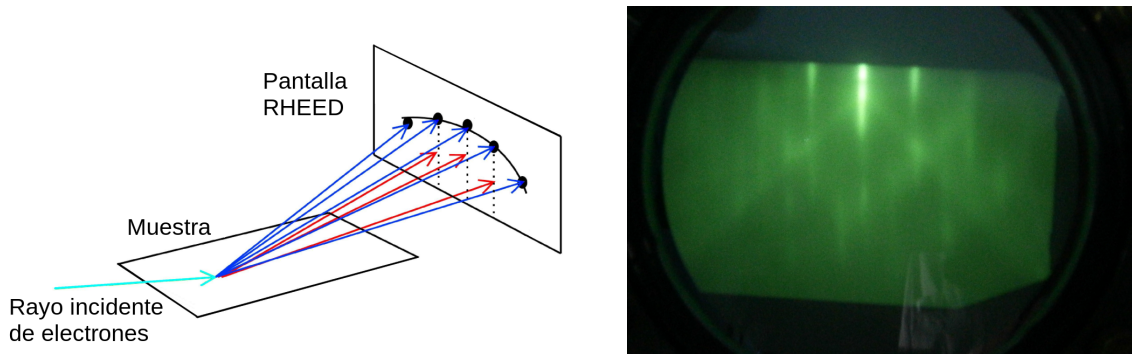


Figura 2.3: A la izquierda, el proceso de reflexión de los electrones difractados por los átomos de la superficie de la muestra. A la derecha, una fotografía tomada de la pantalla del RHEED durante un crecimiento de una oblea de GaAs (arseniuro de galio). Se puede apreciar como la reflexión de los electrones forma una serie de patrones.

Veeco. Este modelo se compone de tres cámaras: la cámara de carga, la cámara de almacenamiento y transferencia y la cámara de crecimiento. Cada cámara lleva incorporada su propia bomba de vacío.

La cámara de transferencia está preparada para ser conectada hasta a tres cámaras de crecimiento y puede almacenar hasta ocho obleas de tres pulgadas. Dispone de un brazo robótico que puede transportar las obleas hacia o desde las cámaras de carga y crecimiento.

A la cámara de crecimiento se pueden conectar hasta diez celdas de efusión. Hasta ahora, han sido conectadas seis celdas que contienen silicio, berilio, indio, galio, aluminio y arsénico. A la celda de arsénico se le ha acoplado una etapa para separar las moléculas de As_4 en As_2 denominada *As-cracker*.

2.2. RHEED

El RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction) es un sistema de caracterización *in-situ* a tiempo real comúnmente usado en el crecimiento de capas cristalinas por MBE [Cho, 1970]. Su desarrollo permitió un salto importante en el control sobre la calidad del material crecido. Típicamente se compone de un cañón de electrones de alta energía (desde los 10 a los 30 keV) y una pantalla luminiscente de fósforo. El cañón emite un haz de electrones que impacta sobre la superficie de la muestra con un ángulo de incidencia muy pequeño para que los electrones puedan escapar de la superficie. Debido a la naturaleza como onda del electrón, se produce una difracción al incidir sobre los átomos de la superficie. Una parte de estos electrones difractados colisionará con la pantalla de fósforo creando unos patrones que estarán determinados por la morfología de la superficie de la muestra (Figura

2.3).

El sistema RHEED suele complementarse con una cámara para capturar los patrones que aparecen en la pantalla de fósforo y con un software que permite realizar ciertos análisis de las imágenes capturadas. Analizando los patrones RHEED se pueden ajustar parámetros ya comentados, como la temperatura real del sustrato durante el crecimiento o los flujos moleculares provenientes de las celdas de efusión. Así mismo, permite calcular la velocidad de crecimiento de capas monoatómicas o la relajación de esfuerzos en estructuras multicapa. Estos son sólo unos ejemplos comunes de aplicaciones del RHEED, pero el abanico de posibilidades que ofrece es muy amplio.

En la actualidad hay disponible software comercial para el análisis de patrones del RHEED (kSA 400, RheedVision Pro, etc.), sin embargo, en este proyecto se toma la decisión de implementar un sistema de medida propio principalmente por dos motivos. El primero y fundamental, el poder tener un control total sobre todos los componentes del sistema. Esto posibilita el desarrollo de una plataforma que permita estudiar, no únicamente los datos de interés que suelen ofrecer las soluciones comerciales, sino también tener la libertad de estudiar en un futuro cualquier característica que se pueda observar en los patrones. En segundo lugar, supone un ahorro en el coste, ya que los sistemas actuales tienen un precio considerablemente alto.

De los patrones que se forman en la pantalla hay uno que es especialmente significativo para la realización de este proyecto. Es el patrón más diferenciable y brillante que aparece en la pantalla del RHEED y se conoce como punto de reflexión especular. Este punto es un círculo que aparece en la parte superior de la pantalla y es la zona donde llegan los electrones reflejados con el mismo ángulo que forman el rayo incidente y el sustrato.

2.2.1. Oscilaciones del punto de reflexión especular del RHEED

Si se observan los patrones previamente comentados durante un crecimiento, se aprecia, a la hora de abrir la compuerta de uno de los materiales de semiconductor a crecer, unos cambios en el tamaño del punto especular (ver Figura 2.4). Estos cambios de tamaño van volviéndose más pequeños hasta que pasados unos segundos las variaciones son casi inapreciables por el ojo humano.

Diferentes estudios de forma tanto teórica [Gilmer, 1980], [Weeks and Gilmer, 1979] como experimental [Dobson et al., 1983], [Martini and Quivy, 2001], han concluido que hay una relación directa entre la variación en intensidad que se aprecia

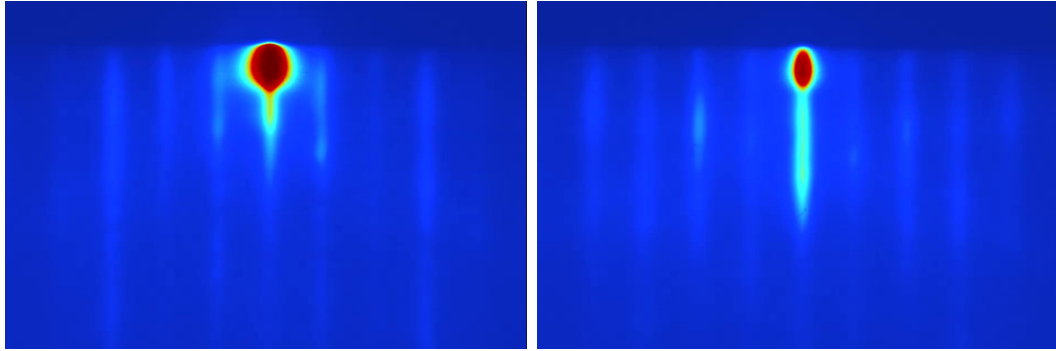


Figura 2.4: Imágenes grabadas de un crecimiento de GaAs con el programa ‘Rheed capture’ desarrollado en este proyecto. Se ha aplicado un mapa de color Jet para facilitar la apreciación de los diferentes niveles de intensidad. A la izquierda, el punto de reflexión especular se encuentra en uno de sus máximos de intensidad (capa completada). A la derecha, en uno de sus mínimos (capa a la mitad de su formación).

en el punto de reflexión especular de la pantalla del RHEED y la tasa de crecimiento por MBE de capas de semiconductores. En concreto, cada período de oscilación se corresponde con el crecimiento de una capa monoatómica. El valor máximo de cada oscilación se da cuando el crecimiento de una capa ha sido completada. El valor mínimo, cuando la capa está aproximadamente a la mitad de su formación. Esto se ilustra con un dibujo en la Figura 2.5.

Averiguando la frecuencia de esta señal oscilatoria se puede, en consecuencia, identificar con bastante exactitud la tasa de deposición a la que se está llevando a cabo el crecimiento. La Figura 2.6 muestra una gráfica real de la evolución de la intensidad que sufre el punto de reflexión especular. En ella se puede apreciar que las oscilaciones se atenúan progresivamente convergiendo a un valor casi constante. Esta atenuación se debe a que antes de terminar de formarse una capa, se forman pequeños islotes de la siguiente capa, produciendo así una mayor dispersión en el ángulo de reflexión de los electrones. Tras varios segundos, la superficie presenta una morfología no especular donde ya no se producen variaciones significativas en la intensidad. Para volver a recuperar una superficie nivelada, la válvula del elemento crecido debe cerrarse y esperar que los átomos presentes en la cámara se vayan depositando hasta tener una superficie homogénea.

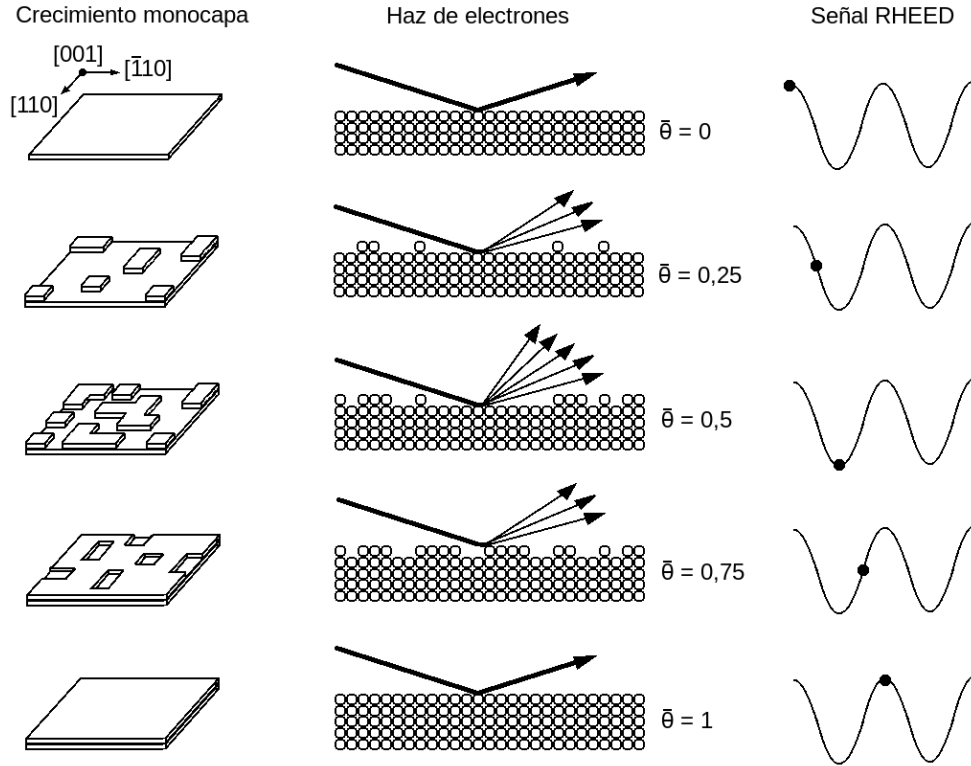


Figura 2.5: Esquema adaptado de [Neave et al., 1983] representando la relación entre el porcentaje de monocapa formada y la intensidad apreciable en el punto de reflexión especular.

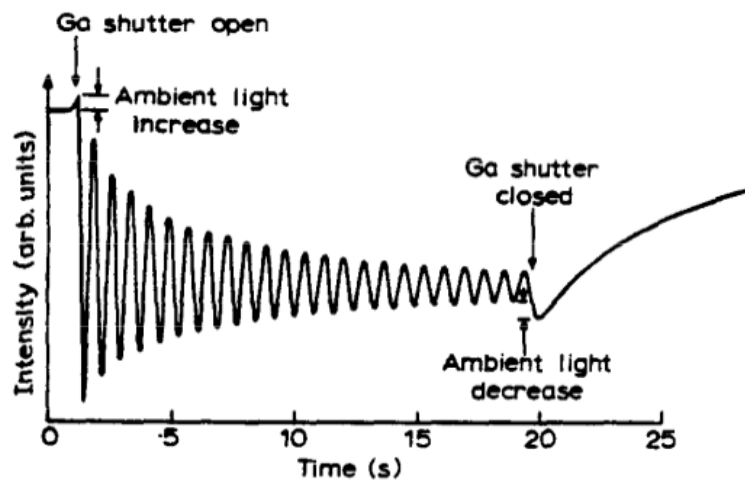


Figura 2.6: Gráfica tomada de [Neave et al., 1983] mostrando la variación de la intensidad del punto de reflexión especular en un crecimiento de GaAs.

Metodología

Para el diseño de la herramienta se ha utilizado el lenguaje de modelado UML (del inglés Unified Modeling Language). El objetivo principal de UML es definir una notación estándar para el modelado de las aplicaciones construidas mediante objetos. UML es un lenguaje de modelado visual que se usa para especificar, construir y documentar los sistemas a desarrollar. En los siguientes apartados se presentan los diferentes pasos llevados a cabo durante el diseño de la arquitectura.

3.1. Análisis de requisitos

Una vez se han expuesto las características del entorno en que se localiza el proyecto, se pasa a especificar los requisitos principales del sistema.

- **Captura de imágenes RHEED.** El sistema debe ser capaz de registrar imágenes provenientes de una pantalla fotoluminiscente perteneciente al sistema de monitorización RHEED. Debido a la importancia de las diferencias lumínicas dentro de los patrones de las imágenes, debe evitarse de la mejor manera posible la entrada de luz exterior.
- **Almacenamiento de imágenes.** El sistema debe almacenar archivos en una extensión de imagen que permita diferentes niveles de compresión. Además, para una más fácil portabilidad de los datos deberá ser capaz de crear vídeos a partir de las imágenes obtenidas.
- **Carga de datos.** El sistema podrá recibir como datos de entrada: imágenes, vídeos o tablas de datos ya analizados.
- **Análisis de la tasa de crecimiento.** El sistema podrá calcular a partir de los tipos de entrada anteriores la velocidad de crecimiento de capas monoatómicas

de semiconductores con un error inferior al 4 %.

- **Guardado de datos.** El programa deberá ser capaz de guardar los datos procedentes del análisis de intensidades de las imágenes para ofrecer la posibilidad de nuevos estudios sin la necesidad de repetir el análisis.

Además existen una serie de requisitos no funcionales referidos a la usabilidad, portabilidad y reusabilidad de la herramienta.

- **Usabilidad.** El diseño de la interfaz se hará de forma que sea lo más intuitiva posible para el usuario del reactor para permitir un uso rápido y eficiente. Además se creará un detallado manual de uso para complementar este requisito.
- **Portabilidad.** Aunque el sistema de análisis de la tasa de crecimiento va a ser usado en este caso en una máquina con sistema operativo Windows, el desarrollo se hará para que funcione con independencia del sistema operativo en el que se ejecute.
- **Reusabilidad.** La herramienta deberá ser desarrollada de una forma modular, que permita una posterior adición de nuevas funcionalidades.

3.2. Casos de uso

A continuación, se procederá a estudiar los casos de uso que debe proporcionar el sistema en base al análisis previo realizado. Se divide en 2 diagramas de casos de uso, siendo el primero el software referente a la captura y almacenamiento de imágenes, y el segundo, a su carga y posterior estudio.

En la Figura 3.1 se puede ver el diagrama de casos de uso correspondiente a la adquisición y almacenamiento de datos.

- **Adquisición de imágenes.** El usuario podrá elegir el nombre de la interfaz que realizará la captura (en el caso de que haya varias), la profundidad de color, la tasa de adquisición y la ganancia con la que se realizará la adquisición. Al arrancar la adquisición el usuario podrá ver en la pantalla las imágenes de la pantalla RHEED que están siendo capturadas.
- **Grabación de imágenes.** El usuario podrá elegir el nivel de compresión con el que se guardarán las imágenes. Además podrá seleccionar la zona de la imagen que quiere que se guarde.

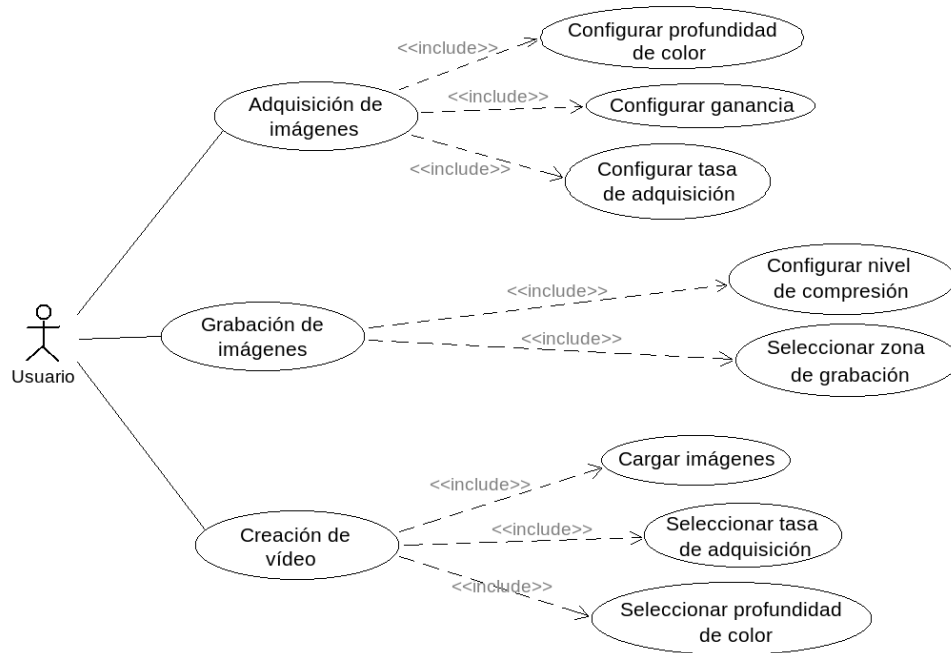


Figura 3.1: Diagrama de casos de uso para la captura y almacenamiento de imágenes.

- **Crear vídeo.** El usuario podrá, partiendo de un grupo de imágenes, realizar un vídeo con ellas para permitir un manejo más fácil de los datos. Deberá poder seleccionar la tasa de adquisición y profundidad de color utilizadas.

Una vez se dispongan de los datos, el usuario debe ser capaz de abrirllos y realizar los análisis necesarios. En la Figura 3.2 se puede observar el diagrama de casos de uso correspondiente al análisis de datos.

- **Carga de datos.** El programa deberá ser capaz de aceptar datos en forma de imágenes, de vídeo o de datos previamente salvados por el programa. En la carga de datos se ofrecerá al usuario que seleccione una ROI (Región de Interés, del inglés Region of Interest) sobre la cual quiere que se realice el análisis de intensidades y, una vez hecho, se mostrará el mismo en una gráfica de la pantalla. A continuación, aparecerán nuevas opciones para el análisis de la señal mostrada.
- **Guardado de datos.** El programa deberá, una vez realizado el análisis de intensidades poder guardar esos datos en un formato que pueda cargar el programa para posteriores análisis y en un formato csv para que puedan ser exportados a otros programas.
- **Ajuste de rango.** El usuario podrá elegir el rango de la señal resultante del análisis de intensidades para el posterior cálculo de la tasa de crecimiento. La

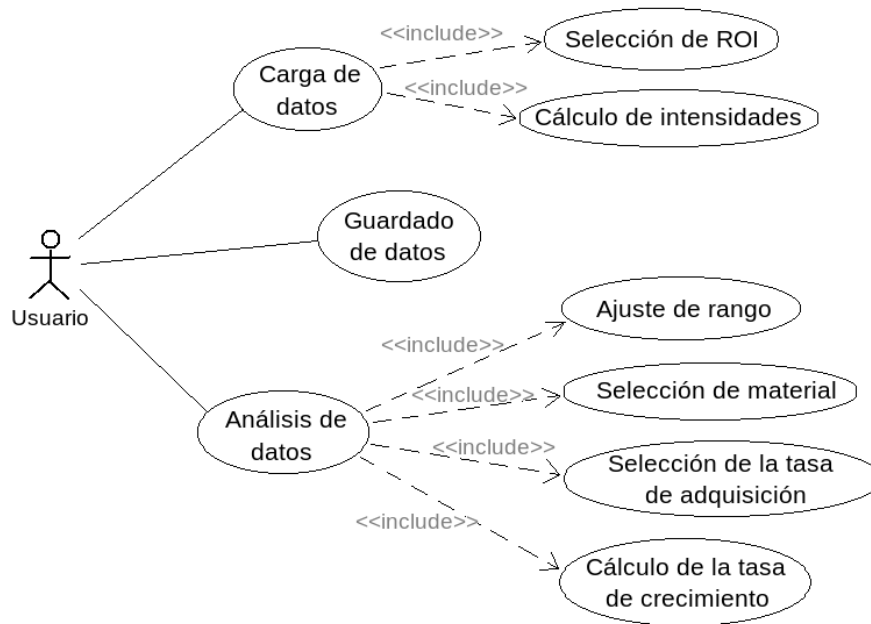


Figura 3.2: Diagrama de casos de uso para el análisis de datos.

señal acotada será mostrada en el segundo gráfico.

- **Cálculo de la tasa de crecimiento.** El usuario podrá ajustar los parámetros del estudio como el material de las capas semiconductoras y la tasa de muestreo (tasa de adquisición). En el segundo gráfico se mostrará la señal estimada sobre la señal original y se mostrarán los resultados en un cuadro de resultados.

3.3. Herramientas

En esta sección se describen las herramientas que han sido utilizadas a la hora de la realización de la parte software del sistema.

Labview

LabView es un entorno de desarrollo con un lenguaje de programación visual mayormente utilizado para el diseño de sistemas hardware y software de sistemas de control, pruebas y simulado. Está desarrollado por la compañía National Instruments y la versión de la que se disponía en el IES era la versión 32-bits de LabView 2012.

Al ser un lenguaje de programación gráfico, la programación en Labview se descompone en dos partes: el panel frontal y el diagrama de bloques. El panel frontal,

es dónde se sitúan todos los elementos que podrá ver el usuario (botones, switches, campos de entrada y salida, pantallas, gráficas, etc). Es lo que se conoce como la interfaz gráfica de usuario. Todos los elementos que se encuentran situados en el panel frontal tendrán su representación en el diagrama de bloques, en el que se realiza toda la lógica programática. Cada elemento, cada operación o cada función está representado por un bloque que se conoce como VI (Instrumento virtual, del inglés ‘Virtual Instrument’). Dentro de un VI puede encontrarse muchos otros VI que se pueden ver abriendo su propio diagrama de bloques y así sucesivamente.

Matlab

Matlab es una herramienta de desarrollo especialmente útil en el tratamiento de matrices y representación de datos y funciones. Tiene su propio lenguaje de programación y permite crear interfaces de usuario. La compañía que lo desarrolla es Mathworks y la versión con la que se ha trabajado fue Matlab R2012 de 64 bits. El software que se ha desarrollado bajo Matlab fue el programa MLRC, que permite calcular la tasa de crecimiento de capas finas por MBE.

MagicDraw

MagicDraw UML es una herramienta desarrollada por No Magic. Está basada en java y su uso está orientado a la creación de diagramas en UML.

Diseño del sistema

En el capítulo 2 se ha presentado el sistema RHEED y la posibilidad de registrar la pantalla con un equipo de captura de imágenes para su posterior estudio. En este capítulo se describe el diseño realizado para ese fin y se detallan cada uno de los componentes del sistema, así como las razones por las cuales han sido elegidos. El capítulo está dividido en tres partes. La primera es una descripción de los elementos hardware que han sido escogidos para la composición del sistema de captura de imágenes. La segunda, enumera y detalla todos los programas desarrollados para la elaboración del sistema de caracterización de imágenes. Por último, se describen los procedimientos realizados para la implementación de la teoría propuesta en la Sección 2.2.1.

4.1. Hardware

En la Figura 4.1 se muestra un esquema de los elementos necesarios para el montaje del sistema diseñado. El sistema consta de una cámara de vídeo, un dispositivo para la sujeción de la cámara y un ordenador. En el ordenador se ha instalado una tarjeta de adquisición de vídeo, que es el componente necesario para la captura de imágenes provenientes de la cámara.

4.1.1. La cámara

La cámara es el dispositivo principal del sistema. Ésta va a permitir capturar las imágenes del RHEED y sus características van a ser clave a la hora de hacer un estudio riguroso. Un sensor que disponga de poco contraste o que no disponga de una buena resolución puede llevar a resultados inexactos a la hora de hacer los estudios. Se tuvieron en cuenta los siguientes factores para la elección de la cámara.

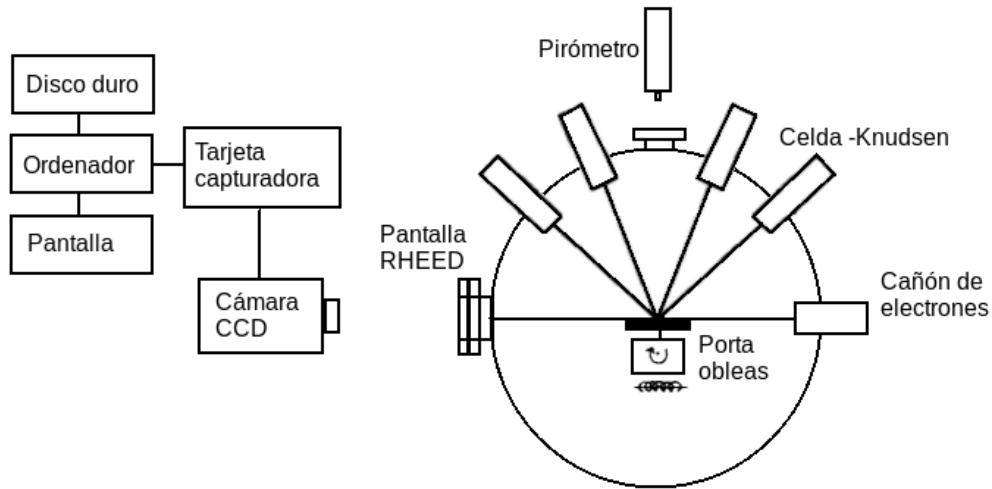


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema de caracterización diseñado.

- El número máximo de frames por segundo (fps) que puede capturar.
- La profundidad de color (bits por píxeles).

Frames por segundo

Las aplicaciones que se tuvieron en cuenta a la hora del inicio del proyecto (estas aplicaciones se describen en el Capítulo 5) no requieren de una alta tasa de fps. Pero como ya se comentó en la sección 2.2, una de las principales motivaciones del proyecto ha sido la posibilidad de futuros estudios (éstos se presentan en el Capítulo 7), con lo que se buscó una cámara de alta velocidad que pudiese proporcionar una tasa de captura que cubriese cualquier futura necesidad.

Profundidad de color

El contraste es otro detalle importante a la hora de la elección de la cámara. Puesto que la pantalla fotoluminiscente emite únicamente luz verde, se consideró que lo más adecuado sería el uso de un sensor monocromo. Esto supondría un ahorro respecto a las cámaras con sensores policromos y además permitiría aumentar la resolución o la profundidad de color para una misma tasa de envío de datos. Por ese motivo se buscó una cámara que permitiese una profundidad de color mayor que el estándar monocromo de 8 bits por píxel.

Teniendo en cuenta las características requeridas se optó por la cámara Basler

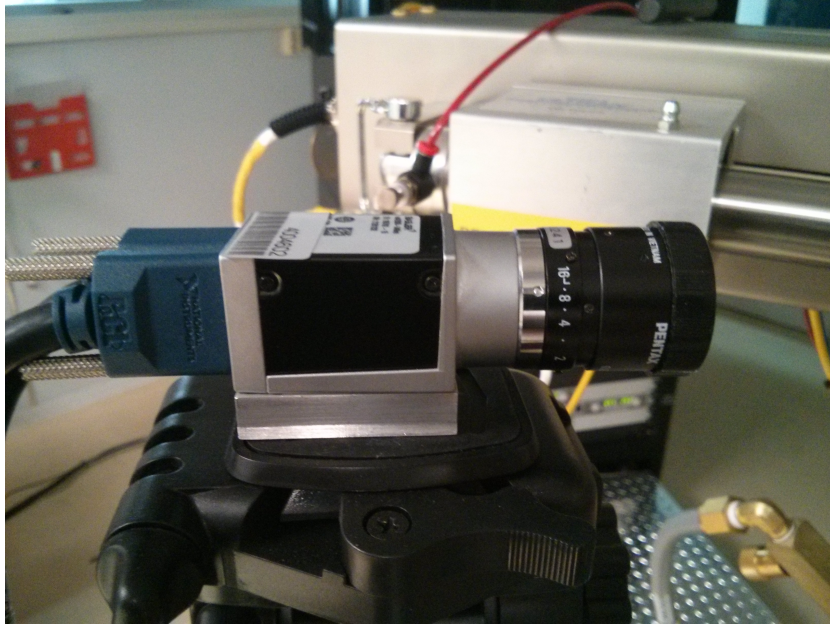


Figura 4.2: Cámara Basler acA2000-340km con objetivo Pentax C32500KP.

acA2000-340km. Ésta presenta una tasa de captura máxima de 340 fps, un sensor monocromo de resolución 2048 pixels x 1088 pixels y una profundidad de color de 8, 10 o 12 bits por pixel (bpp). El tipo de conexión es el estándar Camera Link, que ofrece la tasa más alta de envío de datos para transmisión serie 680 MB/s.

Una vez elegida la cámara se escogió el objetivo recomendado por el fabricante, la Pentax C32500KP, con una distancia focal de 25 mm. En la Figura 4.2 se pueden apreciar la cámara y el objetivo elegidos.

4.1.2. PC y tarjeta de adquisición

El siguiente dispositivo a elegir fue la tarjeta de adquisición. Esta se encarga de recibir la información digital proveniente de la cámara para que esté a disposición del ordenador. La tarjeta debía cumplir con los siguientes requisitos.

- Tener conexión Camera Link para conectar la cámara.
- Garantizar que la velocidad de transmisión al PC fuera igual o mayor a la velocidad máxima que proporciona la conexión Camera Link. Esto se cumplía con una conexión PClex4 que es capaz de proporcionar hasta 800 MB/s.

De las múltiples opciones que se encontraron (EDT, Epix, Euresys, Matrox, Matrix Vision, BitFlow, Active Silicon, National Instruments), se optó por comprar

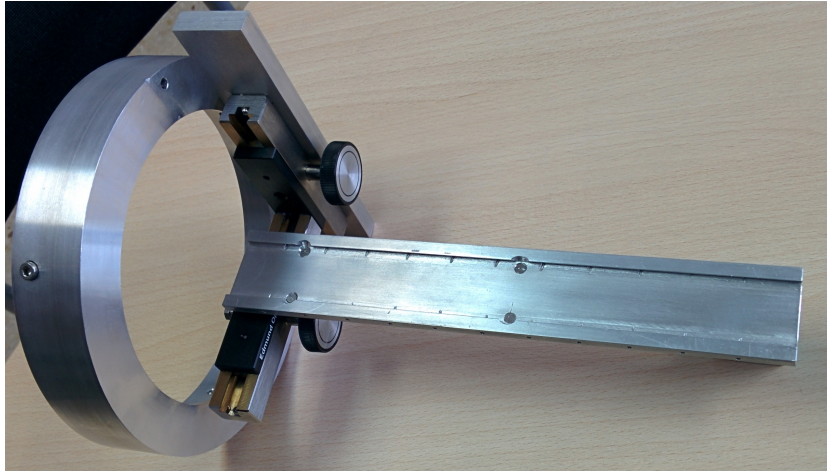


Figura 4.3: Mecanismo de sujeción para la cámara que se construyó inicialmente.

la tarjeta NI PCIe-1433 de National Instruments. La razón principal fue la compatibilidad con el software Labview de National Instruments, del que se dispone en el IES, y que contiene unas librerías específicas para trabajar con esa tarjeta de adquisición.

El ordenador se completó con un procesador Intel i7-3770 de última generación y 16GB de memoria RAM que permitía manejar grandes cantidades de datos y realizar operaciones sobre ellos de forma fluida. Para el almacenamiento se escogió un disco duro de 2 TB de memoria que ofrecía una capacidad suficiente para almacenar imágenes y vídeos durante la duración del proyecto.

4.1.3. Montaje

El sistema que se ha desarrollado precisaba de un mecanismo de sujeción para la cámara que permitiese calibrar el enfoque. La distancia mínima a la que debía situarse la lente según las especificaciones era 25 cm. En primera instancia se construyó una pieza se anclaba a la ventana donde se encontraba la pantalla fotoluminiscente. La cámara se fijaba en una pequeña plataforma que mediante un mecanismo podía desplazarse tanto vertical como horizontalmente. En la Figura 4.3 se puede observar la pieza descrita.

Se realizó un primer conjunto de pruebas con el objetivo de encontrar el punto óptimo de calibración de distancia y apertura del objetivo. Al construir los vídeos con las imágenes adquiridas se observó la presencia de una variación en la posición de los objetos de estudio producida por la vibración proveniente de la rotación del reactor. Este movimiento podría suponer un gran inconveniente en el cálculo de la tasa de crecimiento de las capas de semiconductores, ya que, como se comentó en la

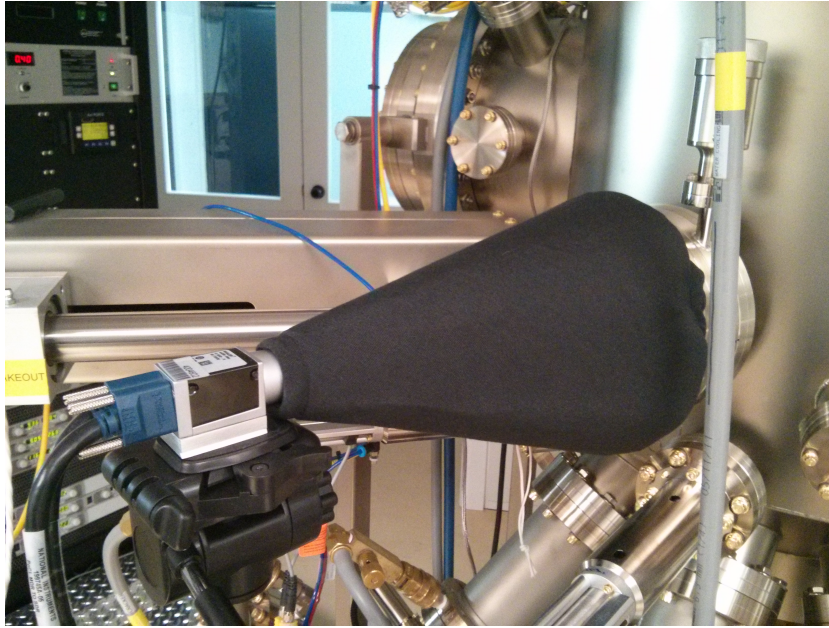


Figura 4.4: Montaje final del equipo de captura de imágenes.

sección 2.2.1, ésta se calcula a partir de las variaciones de intensidad de una zona específica de la pantalla.

Para eliminar la vibración proveniente del reactor y disponer de una cómoda movilidad de la cámara que facilitase el uso de la misma para otros experimentos del centro se optó por no anclar la cámara al reactor. Se escogió como soporte un trípode para cámara fotográfica con pastillas antivibración. Para aislar el sensor de la luz exterior se usó un cono de algodón negro con extremos ajustables que impedía cualquier entrada de luz exterior. El montaje final se muestra en la Figura 4.4.

4.2. Software

En esta sección se va a describir el software que compone el sistema de caracterización. Para su desarrollo se escogió que la programación se llevase a cabo en las plataformas de desarrollo LabView y Matlab. La primera, usada en la parte de adquisición de imágenes, debido a que en el IES es una herramienta comúnmente utilizada para realizar programación que haga uso de elementos hardware. Además, como ya se explicó cuando se habló de la elección de la tarjeta capturadora, tiene unas librerías específicas para visión donde están soportadas la tarjeta y cámara escogidas. La segunda, usada en la parte de análisis, por la idoneidad de este lenguaje para trabajar con matrices y señales y representar funciones. Además disponía de un entorno de programación de interfaz gráfica (GUIDE) para poder permitir una

fácil interacción con el usuario.

Software desarrollado con la plataforma Labview:

- *Rheed capture*, software que se encarga de comunicarse con la cámara, configurar sus parámetros y almacenar las imágenes.
- *Create video*, que se encarga de crear vídeos comprimidos a partir de una carpeta de imágenes.

Software desarrollado con la plataforma Matlab/GUIDE:

- *MLRC*, software que permite calcular la tasa de crecimiento de capas finas por MBE.

4.2.1. Rheed capture

Rheed capture es el programa se encarga de todo el proceso de configuración de parámetros de captura, de la selección y adquisición de imágenes y de su almacenamiento. Para ello el software hace uso, entre otras, de las librerías específicas para visión (IMAQ) que ofrece Labview.

Panel frontal

La Figura 4.5 muestra una imagen completa del panel que ve el usuario al arrancar el programa. Se compone de las siguientes partes:

Área de configuración de la cámara. Dentro de este área el usuario dispone de tres campos donde puede configurar diferentes parámetros de la cámara para la captura de imágenes. En la siguiente lista se describen los tres parámetros que se le permite al usuario configurar a la hora de comenzar una sesión de captura.

- Bits per pixel: El programa ofrece la posibilidad de digitalizar las imágenes usando 8, 10 o 12 bits por píxel. A mayor valor mayor tamaño tendrán las imágenes y mayor será la tasa de datos de envío de la cámara a la tarjeta de adquisición.

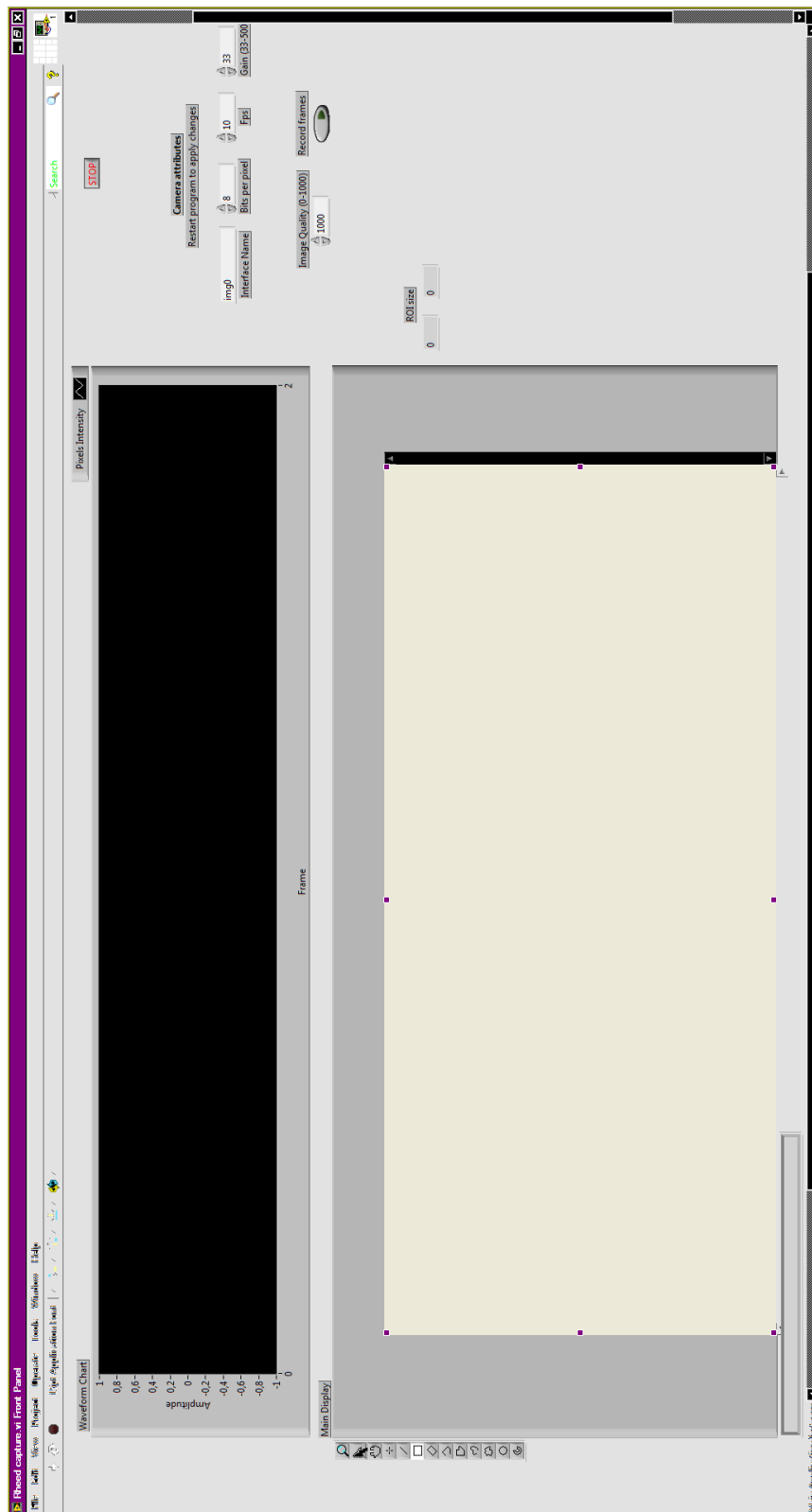


Figura 4.5: Interfaz gráfica de usuario del programa Rheed capture.

- Fps: El máximo número de frames por segundo que acepta la cámara y por tanto el programa son 340. Al igual que ocurre con los bits por píxel, al aumentar el número de imágenes por segundo capturadas aumenta la tasa de datos de envío.
- Ganancia (*Gain*): El programa da la opción de elegir entre una ganancia de 33 hasta una ganancia de 500. La ganancia sirve para aumentar la corriente eléctrica generada por el sensor CCD y suele ser útil cuando se está bajo condiciones de poca iluminación. Al hacer el aumento de manera artificial tiene como consecuencia la aparición de ruido en la imagen. El valor predeterminado y recomendado para este tipo de imágenes donde el margen dinámico es muy alto es 33, que es la mínima ganancia posible que ofrece la cámara.

Los dos primeros parámetros juegan un papel relevante a la hora de no sobrepasar el límite teórico de velocidad de transmisión de datos marcado por la conexión Camera Link de la que dispone la cámara. Usando la ecuación 4.1 se puede calcular la tasa de datos que sería generada usando el valor máximo de los parámetros:

$$fps_{max} \cdot bpp_{max} \cdot res_{max} = tasa_{max} \quad (4.1)$$

$$340 \text{ fr/s} \cdot 12 \text{ bits/px} \cdot (2048 \cdot 1088) \text{ px/fr} = 9091 \text{ Mb/s} = 1136,4 \text{ MB/s} \quad (4.2)$$

El resultado es casi el doble de lo que permite una conexión de Camera Link (680 MB/s). Para el objetivo de este proyecto de fin de carrera el número de fps no es un factor limitante (se hablará en el Capítulo 7 de futuros trabajos que sí pueden requerir un alto valor de fps), ya que tasas de 30 o 40 fps serán más que suficientes. Estas tasas de fps aseguran que para la captura de imágenes se podrá usar la máxima resolución y el número máximo de bpp sin sobrepasar la tasa de datos máxima de la conexión Camera Link.

Los parámetros de configuración deberán ser seleccionados antes de empezar la captura de imágenes. Si se desea modificarlos durante una captura habrá que presionar el botón STOP para parar la sesión y volver a pulsar el botón de correr el programa.

Área de visionado. El área de visionado se compone de dos gráficos. El gráfico inferior es el gráfico principal donde aparecerán las imágenes que esté captando la cámara una vez el programa haya sido arrancado. El programa permite que sobre estas imágenes el usuario usando el ratón, delimite el área que quiere que sea grabada con el programa. Si ningún área es seleccionada el programa grabará la imagen completa. A la derecha del gráfico se puede apreciar las coordenadas del área seleccionada. La grabación de imágenes más pequeñas permite elevar el número

de frames por segundo con el que se captura. El gráfico superior va mostrando el análisis de intensidades a tiempo real del área seleccionada en el gráfico principal. Se hablará más sobre el uso de esta gráfica en los Capítulos 5 y 7.

Área de grabación. El área de grabación se compone de un parámetro de configuración de la calidad de la imagen y un botón que le indica al programa que debe comenzar o parar la grabación. El programa almacena las imágenes en formato PNG (*Portable Network Graphics*). PNG es un formato de compresión de imágenes que permite una compresión sin pérdidas. Dependiendo del valor que se le asigne al parámetro el programa comprimirá la imagen sin pérdidas (valor 1000, predeterminado), hasta una imagen de tamaño mucho más pequeño pero con mucha pérdida de información (valor 0).

Botón de apagado. Al pulsar este botón, se reiniciarán los gráficos y botones a sus valores por defecto y se saldrá del programa.

Diagrama de bloques

Rheed capture está dividido en cuatro bloques que se ejecutan secuencialmente. La Figura 4.6 muestra el diagrama de flujo creado para programa con cada uno de los cuatro bloques marcados. Los bloques son los siguientes:

- Inicialización de variables. Se vacían los gráficos y se vuelven a establecer los valores predeterminados de ciertos parámetros.
- Inicialización de la sesión de IMAQ. Se establece comunicación con la cámara, se configuran sus parámetros y se crea la sesión para captura de imágenes.
- Bucle de adquisición de imágenes. Es el bloque principal del programa. Se está repitiendo continuamente hasta que se pulsa el botón de parada. Está continuamente adquiriendo imágenes de la cámara y mostrándolas en el gráfico principal. Si se pulsa el botón de grabado comienza a almacenar la imagen (o el área seleccionada de la imagen) en carpetas cuyo nombre contiene la fecha, hora e información de los fps y bpp usados en la adquisición.
- Finalización de sesión IMAQ y fin de ejecutado del programa.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se puede observar los 4 bloques de programación Labview.

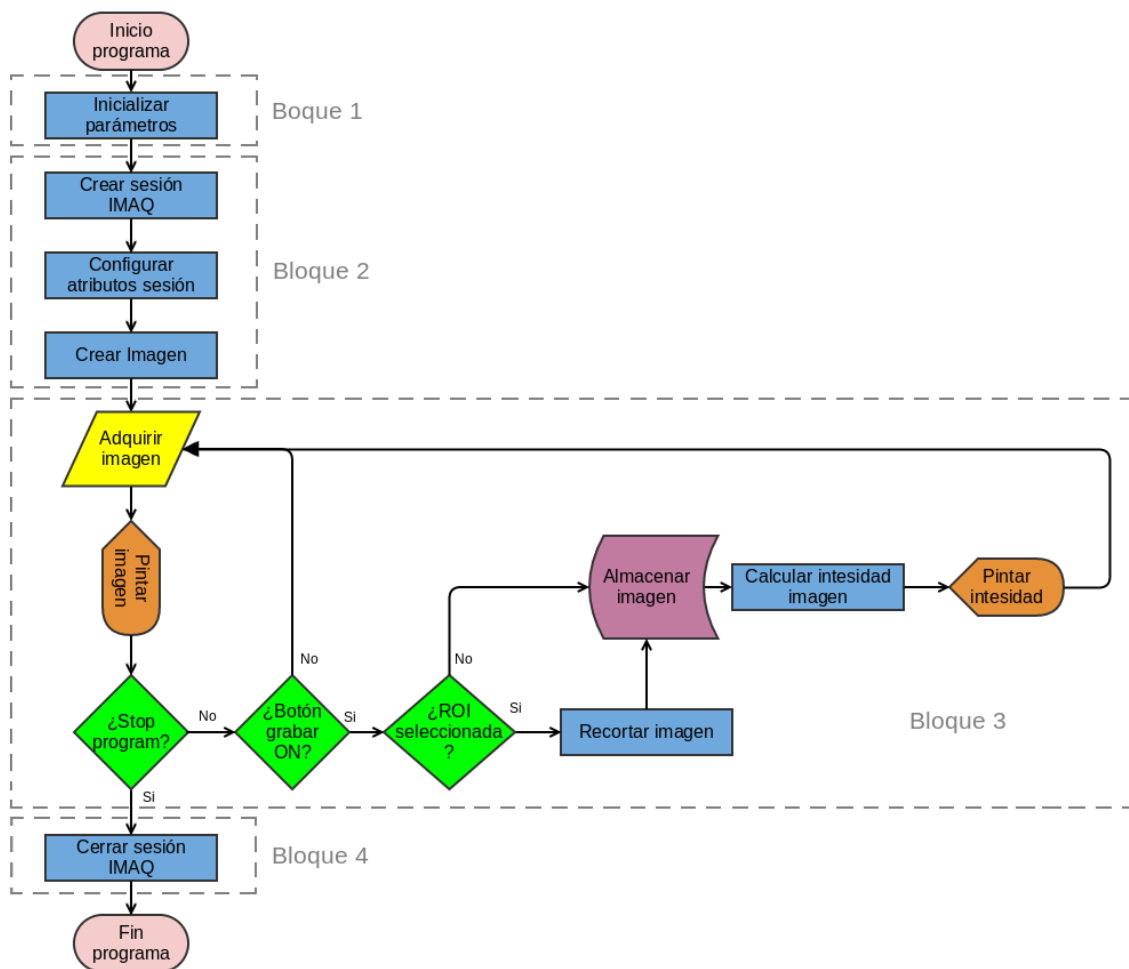


Figura 4.6: Diagrama de flujo de Rheed capture.

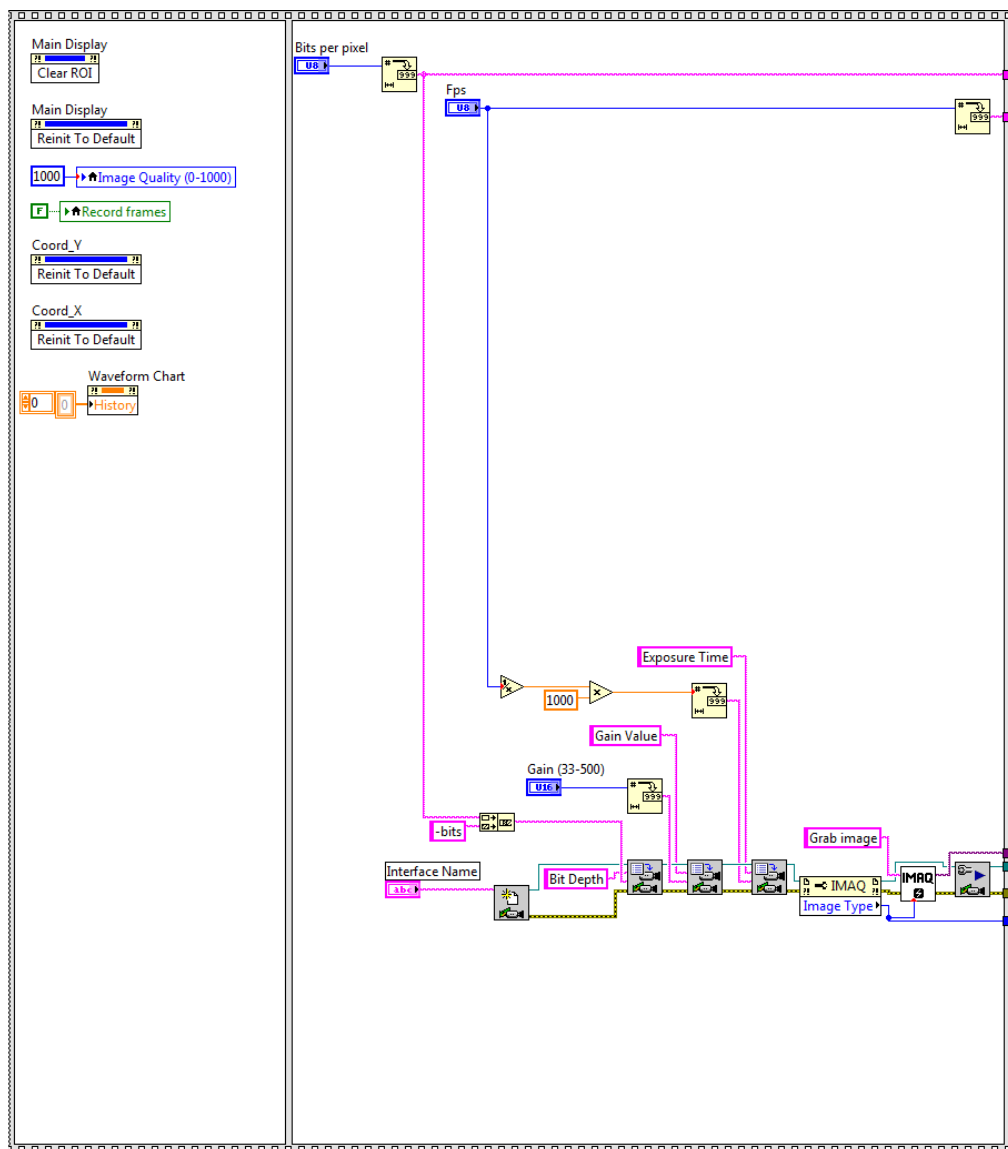


Figura 4.7: Bloques 1 y 2 de la programación Labview de Rheed capture.

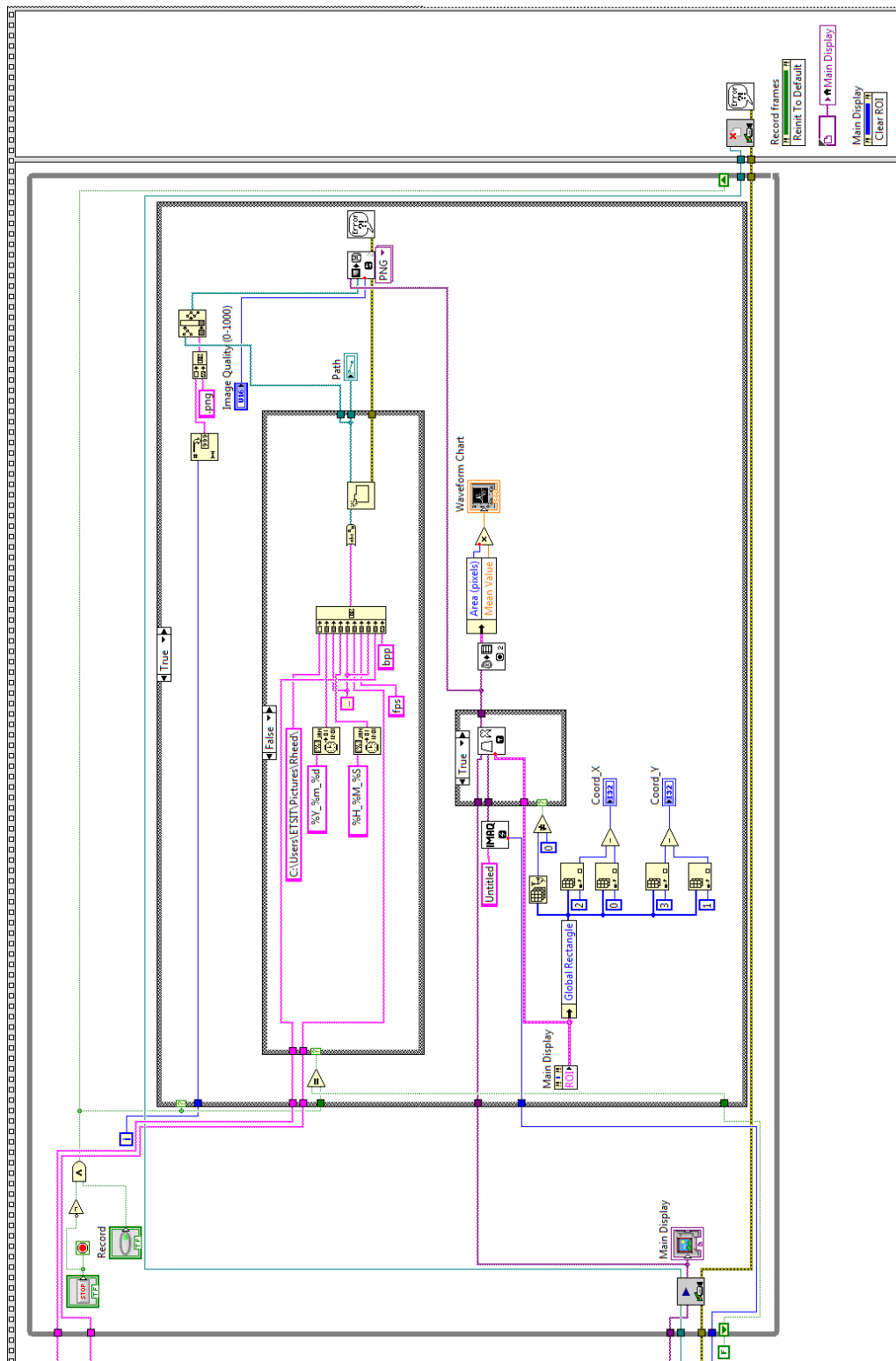


Figura 4.8: Bloques 3 y 4 de la programación Labview de Rheed capture.

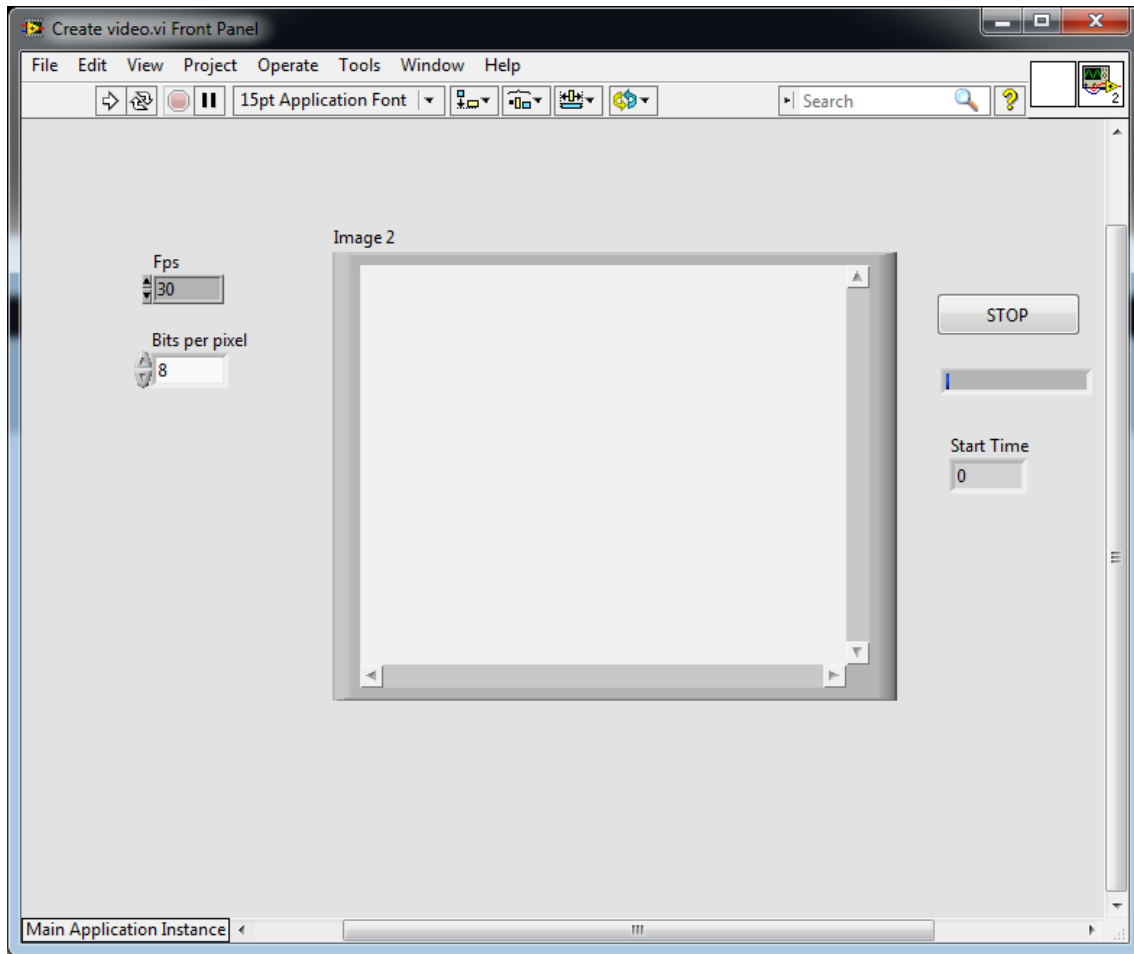


Figura 4.9: Interfaz gráfica del programa Create video. Los campos *Fps* y *Bits por píxel* deben ser configurados antes de la ejecución del programa.

4.2.2. Create video

Debido a la gran cantidad de espacio que ocupan las grabaciones se consideró que para un almacenamiento a largo plazo, muchos de los crecimientos podían ser almacenados en vídeos comprimidos. La creación de vídeos no sólo supone un ahorro de espacio local, si no que facilita mucho las cosas a la hora de compartir datos con la comunidad científica. Adjuntar un vídeo comprimido es mucho más eficiente que adjuntar una carpeta con cientos de imágenes sin pérdidas de gran tamaño.

Se decidió desarrollar un software en Labview que permitiese crear vídeos a partir de imágenes cuya profundidad de color fuese cualquiera que ofrezca la cámara Basler, en este caso, 8, 10 ó 12 bits por píxel. En la Figura 4.9 se muestra la interfaz gráfica de usuario del programa.

Panel frontal

En el panel frontal se incluyeron dos parámetros fundamentales para la adquisición de imágenes: el número de bits por píxel y el número de frames por segundo. El primero era necesario para saber de cuántos bits debíamos aplicar el relleno a cada píxel (los vídeos sólo aceptan imágenes con, o bien 8, o bien 16 bits por píxel), mientras que el segundo es un parámetro necesario a la hora de hacer la codificación de vídeo. El usuario debe introducir estos dos parámetros manualmente antes de arrancar el programa.

También se añadió un display que reprodujese el resultado una vez terminada la codificación del vídeo para comprobar que era satisfactorio. Una vez terminada la creación del vídeo el programa reproducirá el contenido íntegro del vídeo, aunque podrá ser interrumpido en cualquier momento por el usuario. La Figura 4.9 muestra la interfaz gráfica de usuario del programa Create video.

Diagrama de bloques

‘Create video’ se compone principalmente de tres etapas. En la Figura 4.10 se puede apreciar el diagrama de flujo creado para el desarrollo del programa. Dentro del diagrama se especifican las diferentes etapas o bloques en los que se dividió. Estos bloques son:

- *Selección de carpeta y carga de imágenes.* Al arrancar el programa dará a elegir una carpeta al usuario y realizará una lista con las imágenes PNG que se encuentren dentro de la carpeta.
- *Creación del vídeo.* Se crea un contenedor AVI. Se ajustará las imágenes a 8 o 16 bits por píxel y se irán añadiendo las imágenes al vídeo a la frecuencia establecida. Una vez que ya no queden imágenes se cerrará el contenedor AVI y el vídeo ya estará listo.
- *Reproducción del vídeo.* En la pantalla que aparece en el panel frontal se reproducirá el vídeo que acaba de ser creado para comprobar que los resultados son como se esperaban.

En las Figuras 4.11 y 4.12 se observan los diagramas de bloques de Create video.

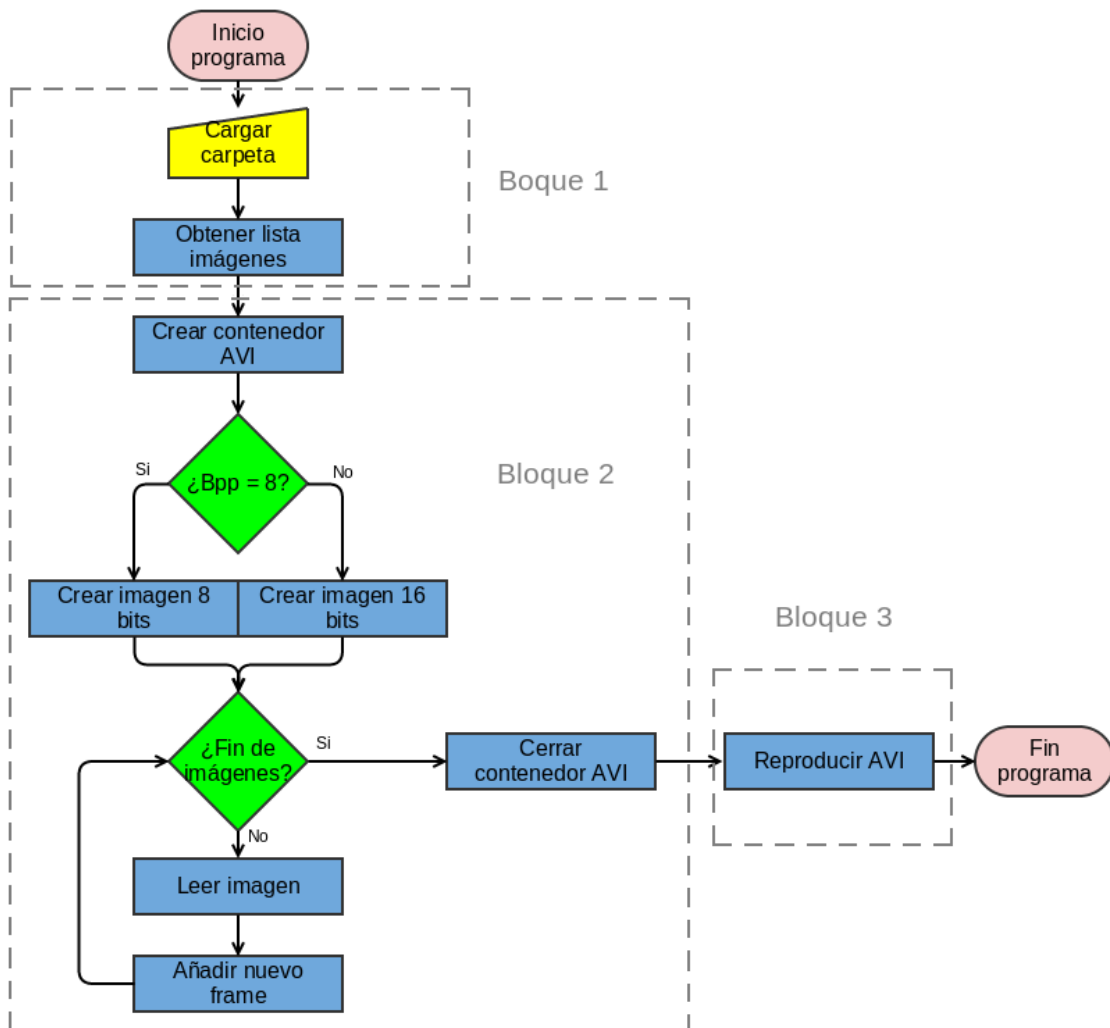
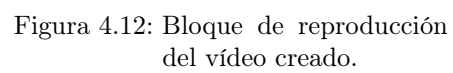
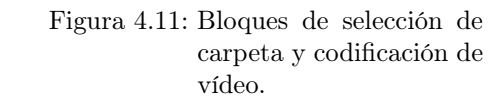


Figura 4.10: Diagrama de flujo del programa Create video mostrando los tres bloques en los que se dividió.



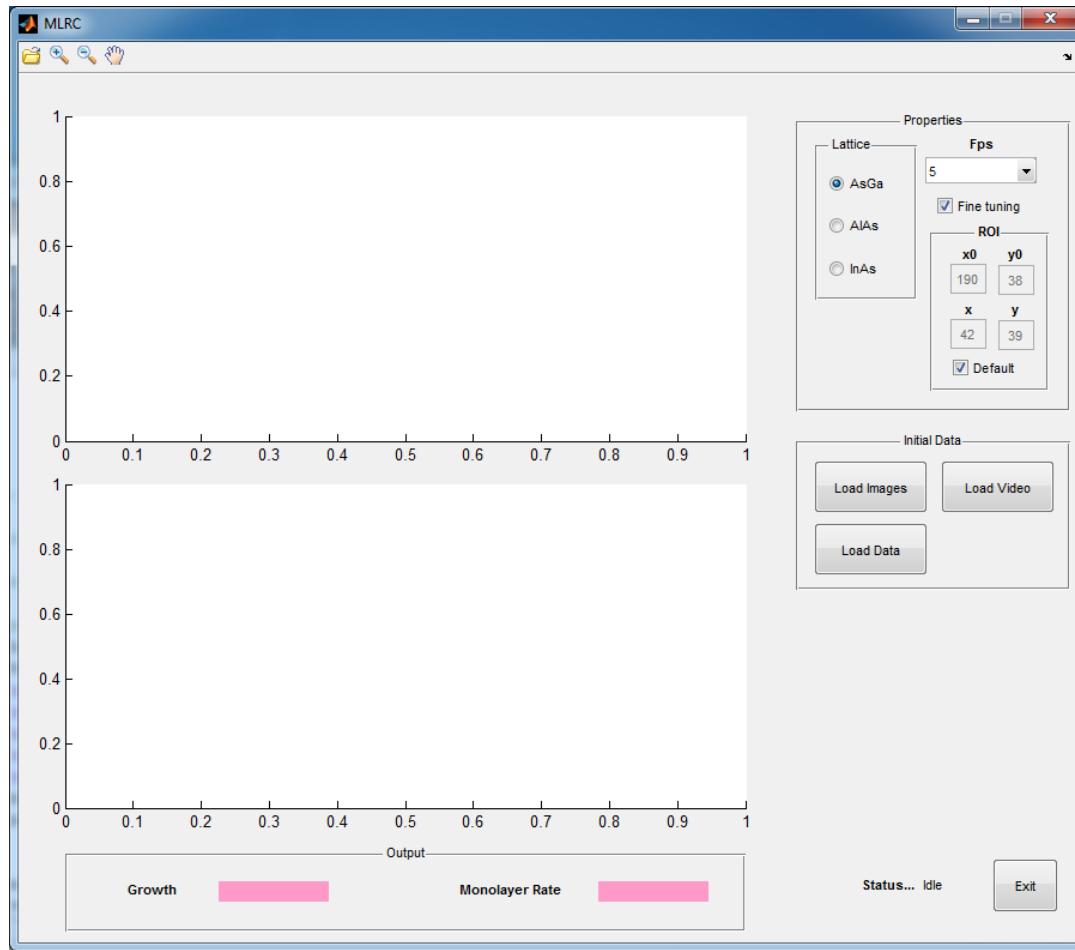


Figura 4.13: Vista inicial de la interfaz gráfica del programa de análisis MLRC.

4.2.3. MLRC

MLRC (del inglés Monolayer Rate Calculator) es el programa que se encarga de la carga y el análisis de un grupo de imágenes con el objetivo de realizar una estimación de la tasa de depósito a la que se ha llevado a cabo un crecimiento epitaxial. Para hacer esta tarea el programa se basa en el fenómeno explicado en la Sección 2.2.1. MLRC ha sido desarrollado con GUIDE, un entorno de desarrollo que ofrece Matlab para crear interfaces gráficas de usuario.

El programa se compone de dos partes principales. La primera, es la carga de imágenes y su correspondiente análisis de intensidades. La segunda, se trata del análisis específico de la tasa de crecimiento a partir de la señal de intensidades generada. La modularidad con la que ha sido diseñado permite la fácil extensión en un futuro con otras funcionalidades, con la única necesidad de añadir botones y asociarles un código que cumpla la funcionalidad requerida.

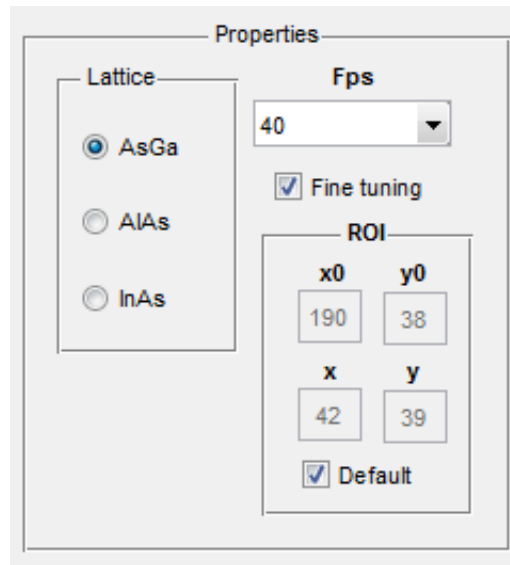


Figura 4.14: Área de propiedades de la interfaz gráfica del programa MLRC.

Interfaz gráfica

En la Figura 4.13 se muestra la interfaz gráfica que ha sido diseñada. A continuación se describen las diferentes partes que la componen.

Área de gráficos. Se compone de dos gráficos situados a la izquierda de la interfaz. En el gráfico superior se mostrará el resultado del análisis de intensidades que se haga sobre el conjunto de imágenes. El gráfico inferior será donde se muestre la señal a estudiar y la señal reconstruida tras la simulación. El área de gráficos se encuentra en la parte izquierda de la captura que aparece en la Figura 4.13.

Área de propiedades. Son varios parámetros que el usuario puede ajustar para los diferentes análisis. La Figura 4.14 muestra este área. Los cuatro campos de los que consta se describen a continuación.

- *Lattice.* Permite seleccionar el tipo de red que está siendo crecido. Las opciones son GaAs, AlAs (arseniuro de aluminio) e InAs (arseniuro de indio).
- *Fps.* Permite seleccionar los fps a los que se llevó a cabo la adquisición de imágenes. Este parámetro representa la frecuencia de muestreo, la cual es necesaria para el cálculo de la frecuencia fundamental de la señal que se analizará más adelante en la sección 4.3.

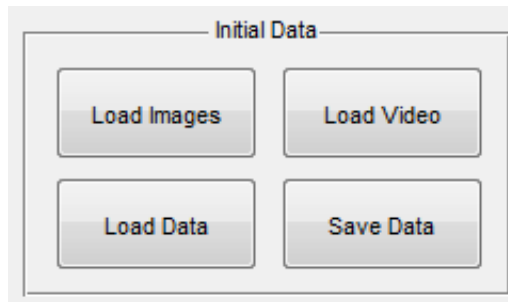


Figura 4.15: Área de manejo de datos de la interfaz gráfica del programa MLRC.

- *Fine tuning.* Si esta opción está desmarcada, el programa hará el análisis de intensidades de la superficie completa de las imágenes cargadas. Si está marcada, habilita la opción de poder elegir una ROI para el estudio.
- *ROI.* Permite seleccionar los valores iniciales de las coordenadas de la ventana de interés para el análisis de intensidades de la señal.

Área de manejo de datos. El área de manejo de datos se muestra en la Figura 4.15. Se compone de cuatro botones, tres de los cuales son botones de carga de datos que estarán siempre visibles. El cuarto, será un botón de guardado de datos que sólo se mostrará cuando haya datos listos para guardar. Cada vez que se cargue un paquete de datos iniciales, se borrará cualquier dato que hubiera de un previo análisis. Los botones se describen a continuación.

- *Load Images.* Este botón se encarga de hacer el análisis a partir de un conjunto de imágenes. Dependiendo de si el usuario ha seleccionado un ajuste fino en las propiedades, ofrecerá una pantalla para seleccionar una región de estudio. Una vez cargados los datos, comenzará el estudio pasando un filtro de mediana a las imágenes, calculará sus intensidades y pintará la señal resultante en el gráfico superior. El diagrama de flujo del código que ejecuta este botón se puede ver en la Figura 4.16.
- *Load Video.* Este botón realiza una tarea similar al botón Load Images, con la particularidad de que obtiene las imágenes a partir de un vídeo comprimido en formato AVI y no desde archivos en una carpeta.
- *Load Data.* La tercera forma de obtención de la señal de intensidades es a través de datos ya guardados de un análisis previo. Este botón cargará los datos en memoria y pintará la señal en el gráfico superior.
- *Save Data.* Con este botón el usuario podrá guardar los resultados del análisis de intensidades en un fichero mat y un fichero csv.

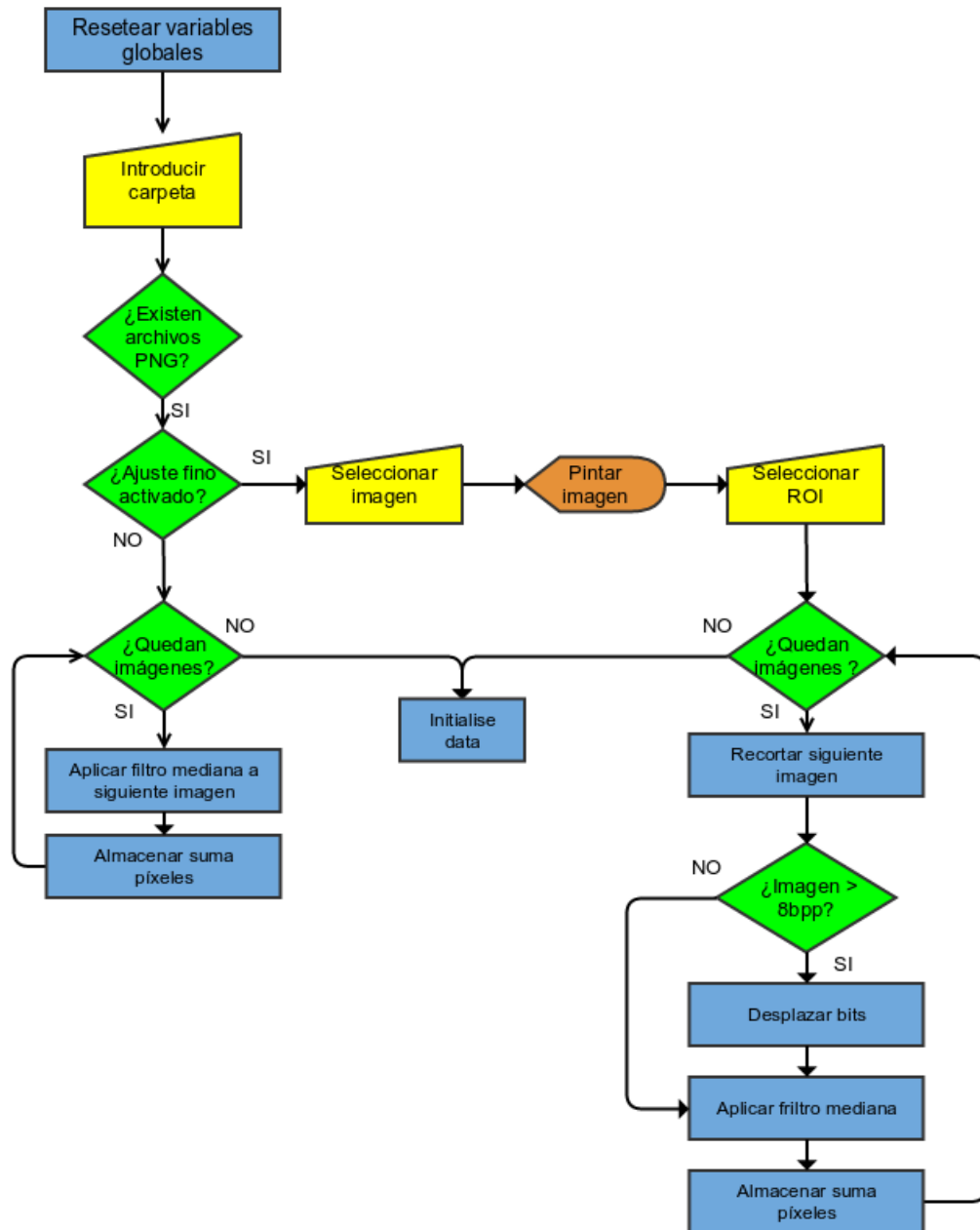


Figura 4.16: Diagrama de flujo del botón Load Images.

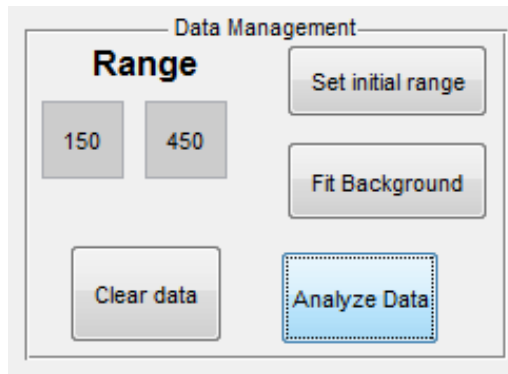


Figura 4.17: Área de estudio de señal de la interfaz gráfica del programa MLRC.

Área de estudio de señal. El área de estudio de señal se muestra en la Figura 4.17. Será visible cuando el programa haya analizado las imágenes y tenga una señal de intensidades a estudiar. Se compone de un campo para indicar el rango de estudio y cuatro botones:

- *Range.* Este campo se compone de dos cuadros de entrada de valores para indicar la muestra inicial y final en la que se realizará el estudio. El valor que tendrán en un comienzo serán los valores inicial y final de la señal del gráfico superior.
- *Set initial range.* Este botón volverá a poner en los cuadros de rango los valores inicial y final de la señal del gráfico superior.
- *Fit background.* Al pulsar este botón el programa pintará en el gráfico inferior el tramo de señal comprendido entre los valores inicial y final del rango. Si alguno de los valores está fuera del rango o se ha dejado en blanco, se indicará donde se ha producido el error dibujando el color del cuadro de color rojo.
- *Clear data.* Pulsando este botón el programa reseteará el contenido de las variables globales del programa.
- *Analyze data.* Este botón será el responsable de ejecutar el código para el cálculo de la tasa de crecimiento de capas de semiconductor una vez que el usuario ha seleccionado el rango de estudio. En la sección 4.3 se hablará más detenidamente de las funciones realizadas por este botón. En la Figura 4.18 se puede observar su diagrama de flujo.

Área de resultados. El área de resultados se compone de 2 cuadros de salida donde el usuario recibirá los resultados arrojados por el programa. Este área se puede observar en la Figura 4.19. Los cuadros que la componen se describen a continuación.

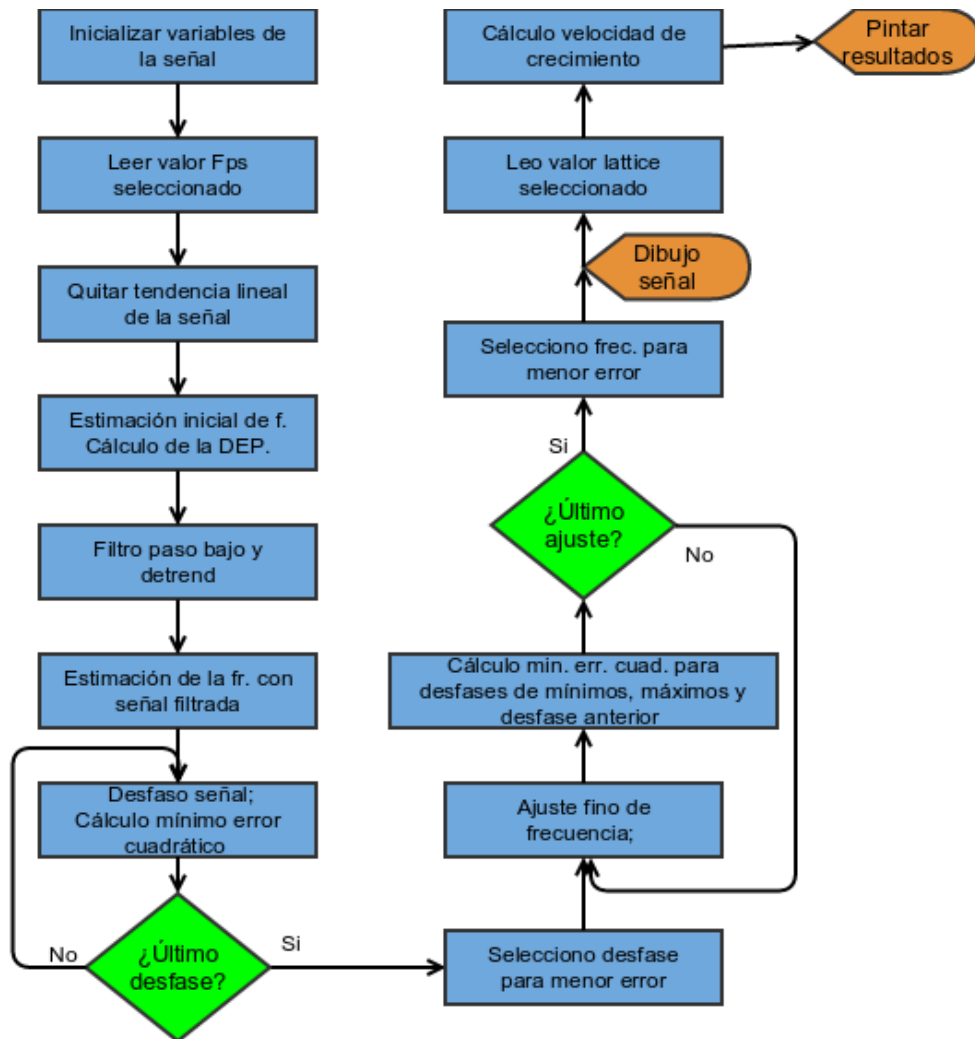


Figura 4.18: Diagrama de flujo del botón Analyze data.

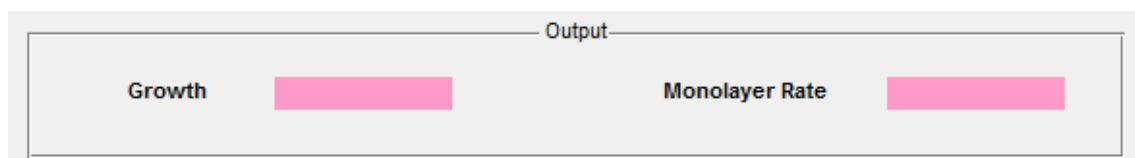


Figura 4.19: Área de resultados de la interfaz gráfica del programa MLRC.

- *Growth*. Donde el usuario podrá ver el espesor de material semiconductor por hora que ha sido crecido (medido en nm/h).
- *Monolayer Rate*. Donde el usuario podrá ver las monocapas de material semiconductor por segundo a las que se ha realizado el crecimiento.

Estado del programa y botón de salida. Por último, el programa presenta un campo de información sobre el estado del programa y un botón de salida.

- *Status*. Ya que algunos procedimientos como el estudio de intensidades de las imágenes pueden llevar un tiempo elevado, se indicará al usuario si el programa está trabajando (*busy*) o está en situación ociosa (*idle*).
- *Exit*. El botón de salida cerrará la interfaz gráfica del programa.

4.3. Tratamiento de señal

En la sección 2.2.1 se hizo referencia a varios estudios donde se relacionaba las oscilaciones del punto especular con la tasa de crecimiento de una oblea en un reactor MBE. En este capítulo se va a exponer el desarrollo que se ha realizado en este proyecto para su implementación.

4.3.1. Obtención de la variación de intensidades con el tiempo

En primer lugar se parte del grupo de imágenes obtenidas por el sistema de grabación de imágenes. Las imágenes provenientes del programa *Rheed Capture* pueden venir en diferentes resoluciones de color: 8, 10 o 12 bits. Al cargar estas imágenes en Matlab se observó que las imágenes de 10 y 12 bits alcanzaban unos valores que superaban el valor máximo que puede obtener un píxel con 10 o 12 bits. El motivo era que Matlab sólo trata con dos tipos de imagen PNG, de 8 y de 16 bits. Cuando carga imágenes de 10 o 12 bits realiza un desplazamiento hacia la izquierda dejando como bits más significativos los 10 o 12 bits por píxel de la imagen original. Como solución, después de dar a escoger al usuario la ventana de estudio, se realiza un desplazamiento de bits contrario al que realiza Matlab, para devolver la imagen al rango original.

Para suprimir el posible ruido provocado por alguna pequeña vibración producida por los motores del reactor se decidió aplicar un filtro de mediana a las imágenes. El filtro de mediana es un filtro paso bajo cuyo objetivo es suavizar la imagen mediante

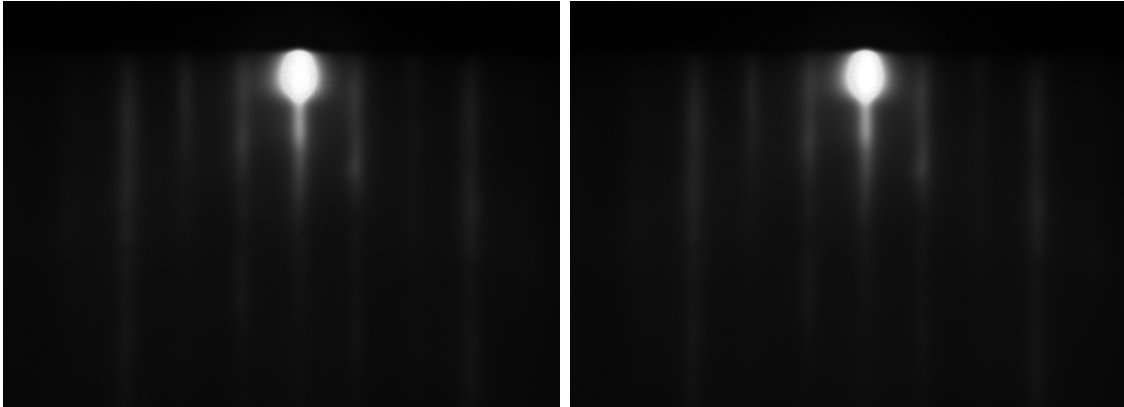


Figura 4.20: A la izquierda, una imagen original del patrón RHEED. A la derecha, la misma imagen después de ser aplicado un filtro de mediana.

la eliminación de ruido. Es un filtro menos sensible a valores extremos y su principal ventaja para esta aplicación respecto de otros filtros como el filtro de media o el de media ponderada es que el valor final del píxel es un valor real presente en la imagen y no un promedio. La Figura 4.20 muestra las imágenes antes y después del filtro de mediana. Aunque a simple vista no se aprecia mucho cambio, observando el valor de los píxeles, se aprecia variación en el valor de muchos de ellos.

Una vez aplicado este filtro, se suma la intensidad de cada píxel de una imagen y se genera una señal con los valores calculados. La longitud de dicha señal es el número de imágenes cargadas.

4.3.2. Estimación de la frecuencia

Una vez se ha obtenido la señal que representa la variación de intensidades en el tiempo y se ha ajustado el rango de estudio, el programa debe hacer una estimación de la frecuencia de la señal.

En primer lugar se eliminan la media o las tendencias lineales, recomendado para el procesamiento de FFTs (Transformada Rápida de Fourier, del inglés *Fast Fourier Transform*). Se analiza la densidad espectral de potencia de la señal, obteniendo así una estimación inicial de las frecuencias más características de la señal. Para este análisis se usa como frecuencia de muestreo la tasa de adquisición de imágenes. Se escoge la frecuencia que presente una mayor potencia, que en el caso que atañe suele ser cercana a 1 Hertzio. La densidad espectral de potencia se puede ver representada en la Figura 4.21.

Para hacer un estudio más limpio se realiza un filtro paso bajo que nos elimine las altas frecuencias, suavizando así el ruido que presenta la curva. Como frecuencia

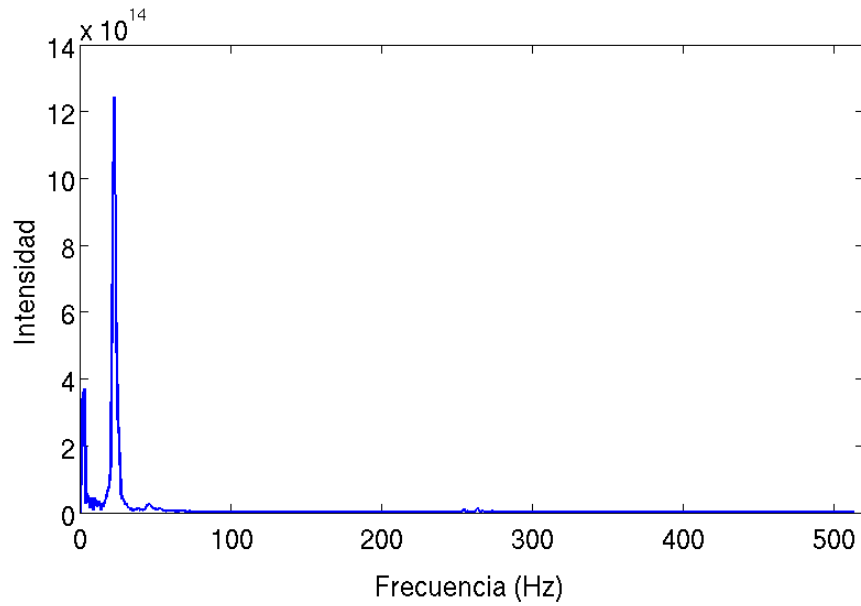


Figura 4.21: Representación de la densidad espectral de potencia de la señal.

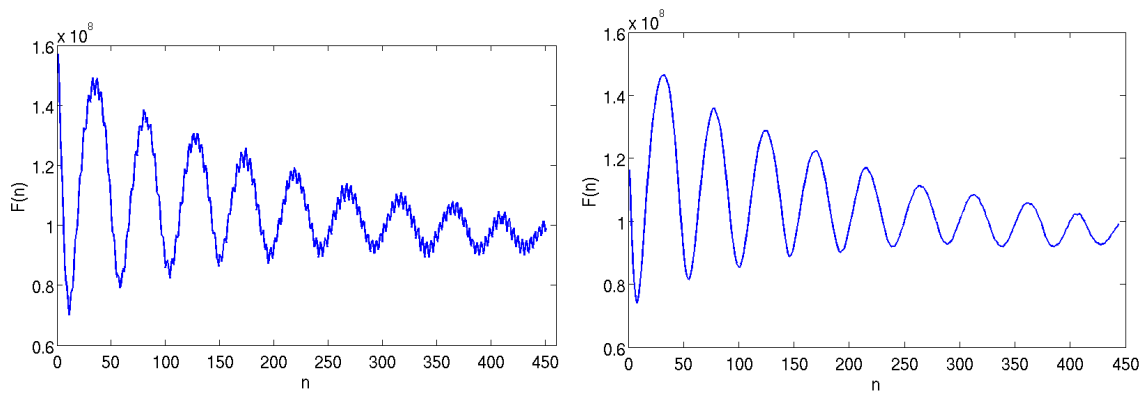


Figura 4.22: A la izquierda, la señal original. A la derecha, la señal después de aplicarle un filtro paso bajo de orden 7.

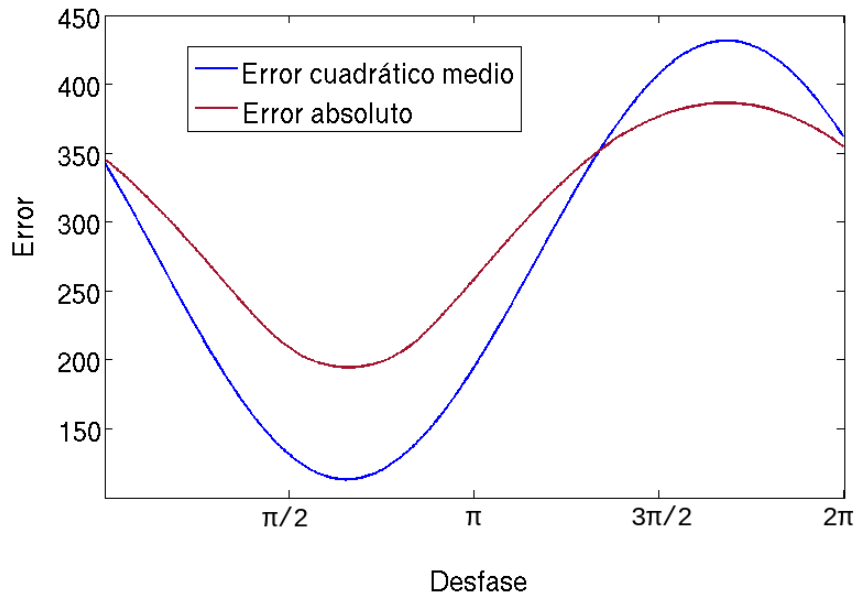


Figura 4.23: Representación de los errores producidos usando el error cuadrático medio y el error absoluto al ir cambiando la fase de la señal estimada.

de corte se eligió una frecuencia cercana y superior a la frecuencia estimada por la FFT. Tras diferentes pruebas se escogió una frecuencia de corte un 15 % superior a la frecuencia estimada. También se probaron distintos órdenes a la hora de realizar el filtro, obteniendo los mejores resultados con un filtro de orden 7. En la Figura 4.22 se puede ver la señal antes y después de la aplicación del filtro paso bajo.

A la señal filtrada se le vuelve a aplicar una función para eliminar la media o tendencias lineales que haya podido producir el filtro digital. Esta señal se normaliza respecto a su mayor valor (absoluto) para que su máximo valor coincida con el máximo valor posible de la función coseno que vamos a reconstruir.

Se vuelve a realizar el cálculo de la densidad espectral de potencia de la señal filtrada y normalizada, obteniendo una nueva estimación de la frecuencia de la señal. Esta estimación se toma como valor inicial para el ajuste que proporcione el menor error entre la señal original y la señal coseno con la frecuencia a estimar. Se probaron diferentes funciones de riesgo como el error absoluto o el error relativo, pero la que dio mejores resultados fue el error cuadrático medio. La Figura 4.23 muestra una gráfica con los errores calculados con la función del error cuadrático medio y el error absoluto al ir variando la fase de la señal. Se puede apreciar que el menor error es el producido por la función del error cuadrático medio.

Para hallar la frecuencia que proporcionara un menor error y dado que la señal original puede comenzar en cualquier punto de un período, se decidió calcular los errores cometidos desde diferentes desfases para cada salto de frecuencia. Se calculó el

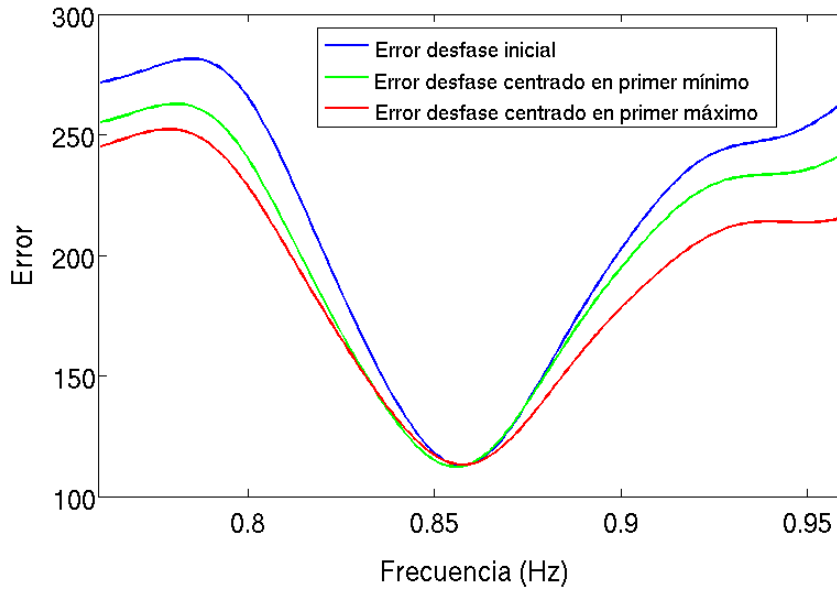


Figura 4.24: Representación del error cuadrático medio cometido con 3 desfases diferentes al ir variando la frecuencia.

desfase que daba menos error para la frecuencia inicialmente estimada y los desfases necesarios para coincidir con el primer máximo y el primer mínimo.

Se procedió entonces a variar la frecuencia estimada en pasos muy pequeños de 1 milihertzio, calculando los errores producidos por la señal con las tres fases diferentes. Tras este cómputo se comprobó el menor error cuadrático medio obtenido y se obtuvo la señal con frecuencia y fase que menos error produce. En las Figuras 4.24 y 4.25 se puede observar respectivamente la comparación del error cuadrático medio cometido con los diferentes desfases al ir variando la frecuencia de la señal y la señal sinusoidal reconstruida con la frecuencia que produce menor error.

4.3.3. Cálculo de la tasa de crecimiento

Como se introdujo en la sección 2.2.1, cada período de oscilación de la señal corresponde a la formación de una capa en un crecimiento MBE. Disponiendo de la frecuencia de la señal se obtiene, por tanto, el número de capas que han sido crecidas por segundo.

Para calcular la tasa de crecimiento en nm/h se necesita la constante de red del material que está siendo crecido. En la columna 2 de la tabla 4.1 se muestran los valores de las constantes de red a una temperatura de 27°C para los materiales inicialmente incluidos en el programa. Usando las fórmulas de variación de la

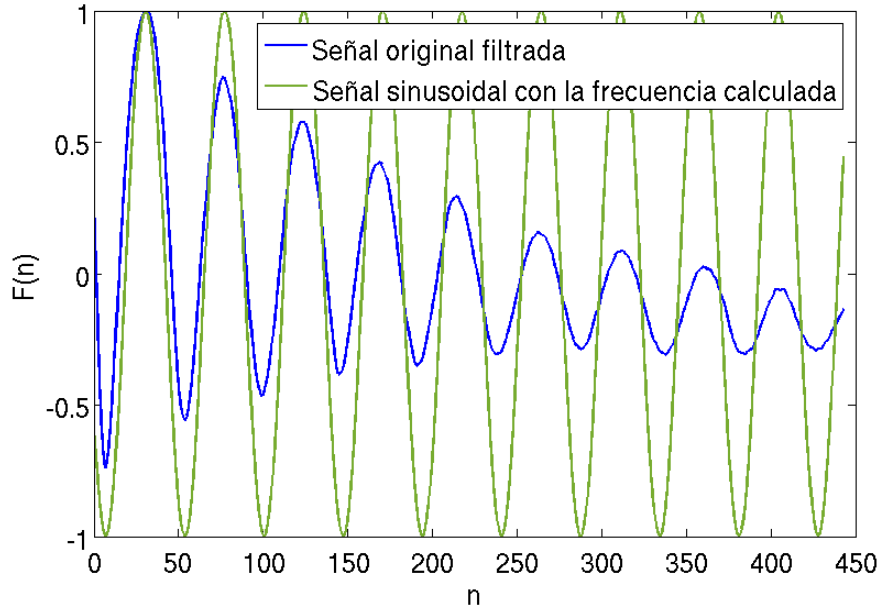


Figura 4.25: Superposición de la señal original y la señal sinusoidal con la frecuencia calculada.

Tabla 4.1: Constantes de red para una temperatura de 27°C de los materiales incluidos.

Material	Constante de red cúbica [nm]	Período de red de monocapa [nm]
GaAs	0.565325	0.2826625
AlAs	0.5662	0.2831
InAs	0.60583	0.302915

constante de red según la variación de temperatura que aparecen en [Brozel and Stillman, 1996] se obtiene que para un aumento de la temperatura de 27°C a 580°C la variación que sufre la constante de red es de un 0.6 %. Si además se tiene en cuenta que las mediciones se hacen con la oblea a temperatura ambiente (donde la constante es la ya referenciada), parece lógico usar este valor para los cálculos. La inclusión de más materiales en un futuro se puede realizar de forma sencilla incluyendo en el código el nuevo material y su valor de constante de red. Los valores utilizados han sido sacados de [Driscoll et al., 1975], [Sector7, 2015].

Sin embargo, estos valores de constante de red corresponden a la distancia de la red cúbica que forma el material al crecer. La distancia que debemos usar según [Renk, 2012] cuando estamos creciendo monocapas es el período de red de monocapa del material (a). Para los materiales utilizados este período corresponde a la mitad de la constante de red cúbica (d). Esta relación se puede apreciar mejor observando la Figura 4.26 sacada de [Renk, 2012] donde se ve un ejemplo con el material GaAs. En la columna 3 de la tabla 4.1 se expresa el período de red de monocapa de cada

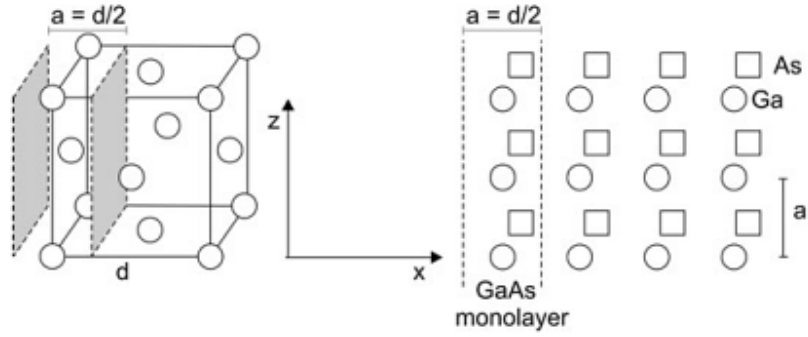


Figura 4.26: Representación de la constante de red cúbica (d) y período monocapa (a) del material GaAs.

material.

Con este dato ya podemos calcular la tasa de crecimiento con la fórmula 4.3.

$$tasa(nm/h) = v_{capas}(ML/s) \cdot constante_{capa}(nm/ML) \cdot 3600(s/h) \quad (4.3)$$

Experimentación y resultados

Hasta este punto se han descrito tanto el hardware empleado como el software que ha sido desarrollado para el sistema. En este capítulo se va a presentar una serie de experimentos realizados para el estudio y caracterización de diferentes parámetros. Como ya se comentó en el Capítulo 2, el abanico de posibilidades de estudio que abre el disponer de las imágenes del crecimiento es muy amplio. Entre ellas se encuentran las que se comentan a continuación y algunas que se comentan en capítulo de futuros trabajos (Capítulo 7).

5.1. Medida de la tasa de crecimiento

El primer ejemplo (y objetivo principal que se consideró a la hora de pensar en la elaboración del proyecto) trata del cálculo de la tasa de crecimiento de capas monocristalinas en un crecimiento por MBE. El propósito de este experimento es establecer una relación entre la tasa de crecimiento de capas de semiconductor y el flujo de galio que se está suministrando¹. Este cálculo permitirá en posteriores crecimientos introducir el flujo necesario para alcanzar la velocidad deseada. El ejemplo corresponde a un crecimiento de capas monocristalinas realizado sobre una oblea de GaAs de 3 pulgadas (ver Figura 5.1).

La temperatura de un sustrato de GaAs que produce mayor amplitud en las oscilaciones de intensidad del punto de reflexión especular en un crecimiento de GaAs se encuentra en el rango entre 540 y 590°C [Neave et al., 1983]. En este experimento se elevó la temperatura del sustrato hasta los 572°C. El cañón de electrones fue alimentado con una corriente de 1,47 A y un voltaje de 14,3 kV. En la Tabla 5.1

¹Los flujos de galio y arsénico dependen de la temperatura de las celdas de efusión. Se han construido tablas con los datos medidos con el medidor de vacío del reactor. En este trabajo se hará referencia a las temperaturas.

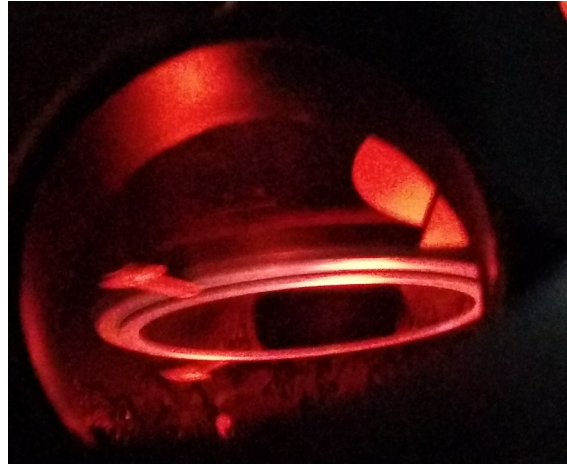


Figura 5.1: Fotografía del interior de la cámara de crecimiento del MBE durante el experimento. Dentro se encuentra una oblea de 3 pulgadas de GaAs.

Tabla 5.1: Temperaturas del sustrato y celdas de Ga y As fijadas para el experimento.

	Temperatura [°C]
Celda galio (punta)	1067
Celda galio (base)	947
As cracker	1000
As base	600
Celda arsénico	370
Sustrato	572

vienen recogidas las temperaturas del sustrato y las celdas de arsénico y galio.

El uso del sistema de caracterización consta en este ejemplo de dos partes: una grabación de imágenes con el programa *Rheed capture* (descrito en la sección 4.2.1), y el posterior análisis y estimación de la tasa de crecimiento con el programa *MLRC* (presentado en la sección 4.2.3). Ya que éste es el principal y más completo uso del sistema y se pretende sirva como manual del usuario, se ha decidido presentar de forma detallada este ejemplo en el siguiente capítulo. Cada uno de los pasos se ilustrará con imágenes para una mejor comprensión del proceso.

La Figura 5.2 muestra el cuadro de resultados obtenido tras el análisis. Para una temperatura de sustrato de 572°C y las temperaturas de las celdas de galio y arsénico de la Tabla 5.1, la tasa de depósito medida es de 868 nm/h.

Se ha observado que no todas las oscilaciones presentan el mismo período. En concreto, la primera pero, sobre todo, las últimas oscilaciones, tienen una pequeña variación en la frecuencia. Para ver la influencia del rango escogido en el análisis se han definido diferentes rangos dentro del período de oscilaciones del punto especular.

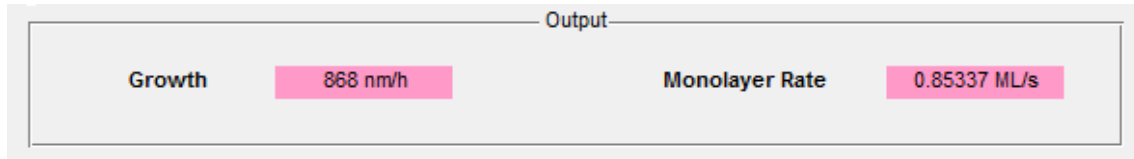


Figura 5.2: Cuadro de resultados del programa MLRC donde se muestra la medida de la tasa de depósito en nanómetros por hora y capas por segundo.

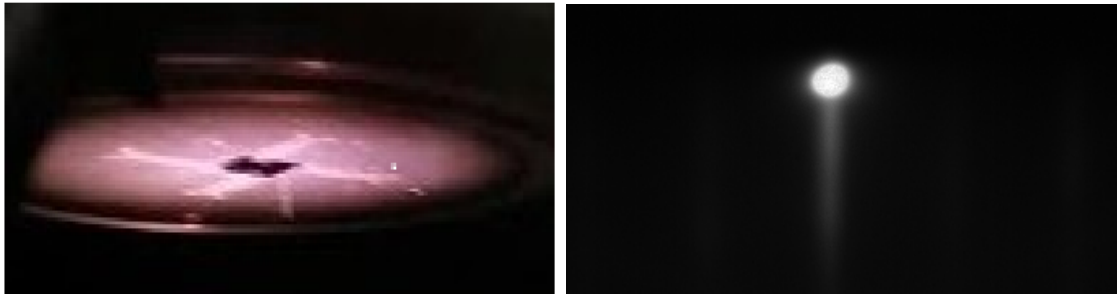


Figura 5.3: A la izquierda, fotografía tomada de una oblea de tamaño 10x10 mm dentro de la cámara de crecimiento del MBE. A la derecha, imagen capturada con el programa Rheed capture del patrón RHEED generado por la misma oblea.

La diferencia entre el mayor y menor resultado ha sido de 8nm/h, lo que se traduce en una varianza máxima de menos del 1 %. Es tarea del usuario ajustar lo mejor posible el rango de estudio a la hora de hacer el análisis.

El proceso de crecimiento tuvo una duración total de 3 horas y 35 minutos. Una vez terminado el proceso se procedió a la extracción de la oblea para su medición y el posterior cálculo del error cometido por el software. Se usó para la medición un perfilómetro láser que presenta un error en la medida de ± 5 nm. La diferencia en el espesor de la oblea antes de introducirla en el reactor y después del crecimiento fue de 3,16 μm . La velocidad de crecimiento medida por el software MLRC es de 868 nm/h, lo que a lo largo de la duración del experimento se traduce en un depósito estimado de 3,11 μm de espesor. Con estos datos se obtiene que el error cometido en esta medida es del 1,6 %, siendo la precisión del orden de la centésima de micra por hora, valor que está dentro del margen de error que se considera aceptable.

Cabe destacar una de las pruebas donde se usó una oblea de tamaño inferior a las usadas normalmente durante los crecimientos. La muestra usada fue una oblea de tamaño 10 x 10 mm con una superficie 45 veces menor a las obleas circulares estándar de 3 pulgadas de diámetro. Después de ajustar los ángulos del cañón del RHEED para conseguir la mejor imagen en la pantalla se observó que con este tamaño de oblea los patrones de reflexión eran mucho menos difusos (ver Figura 5.3). Esto la convierte en una gran elección a la hora de la calibración de los parámetros de funcionamiento del reactor.

5.2. Medida de la temperatura de desoxidación de una oblea

Una superficie libre de impurezas es un requisito fundamental para realizar un crecimiento epitaxial. Las partículas provenientes de la atmósfera pueden contaminar el material de la oblea y producir defectos en la red o modificar las características ópticas y eléctricas de las capas epitaxiales. La mayoría de los fabricantes de obleas las suministran después de un proceso de limpieza y con una capa de óxido natural. Dicha capa puede ser removida dentro de la cámara de crecimiento. El objetivo de este experimento es encontrar la temperatura más baja a la que se puede llevar el sustrato que permita una desoxidación completa de la capa de óxido. A mayor temperatura del sustrato más se acerca a la temperatura de sublimación incongruente del GaAs que según [Grange, 1985] es 650°C.

Antes de introducir la oblea en la cámara de crecimiento para la desoxidación, la oblea se calienta durante varias horas a 200°C en la cámara de carga para eliminar los posibles gases atrapados. Una vez dentro de la cámara de crecimiento, la temperatura del sustrato se eleva (elevando también el flujo de arsénico para no dañar la oblea) hasta que la capa de óxido se haya separado de la superficie. Para poder identificar cuando ocurre este fenómeno se realiza una grabación de la pantalla del RHEED mientras se va elevando la temperatura de la oblea. Cuando la capa de óxido está presente, la imagen que se genera en la pantalla del RHEED es una especie de neblina. A medida que la capa de óxido se libera se van apreciando los patrones típicos del RHEED. Como referencia habitual se usa una temperatura de 600°C [Zhou and Borek, 2012], pero dado que cada reactor es diferente, hay algunas discrepancias a la hora de identificar cuándo ocurre este fenómeno², resultando en medidas de temperaturas que pueden diferir en un máximo de 20 a 40°C [Anselm, 2012].

Se fijó una pendiente de calentamiento objetivo de 15°C por minuto; en la Figura 5.4 se presenta la evolución real de la temperatura durante el calentamiento de la muestra. A los 40 minutos del proceso se determinó que los patrones RHEED ya no mejoraban en nitidez y se dio por completada la desoxidación midiendo una temperatura de 610°C. En la Figura 5.5 se aprecian cuatro imágenes tomadas a diferentes temperaturas para ilustrar el cambio producido en los patrones formados por la reflexión de los electrones a medida que la capa de óxido va desapareciendo.

²El espesor capa de óxido de la superficie también influye en la temperatura necesaria para completar el proceso de desoxidación.

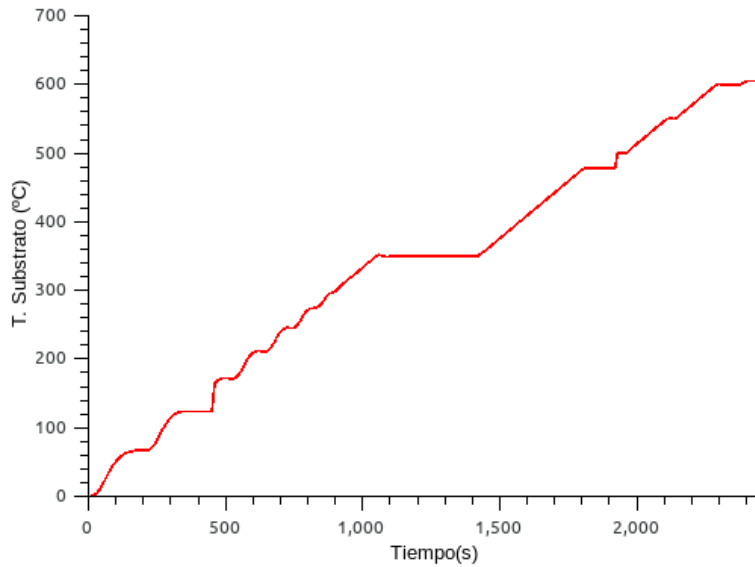


Figura 5.4: Evolución de la temperatura de la oblea durante el proceso de desoxidación.

5.3. Calibración del mínimo flujo de arsénico

A la hora de realizar un crecimiento por MBE de GaAs, el flujo de arsénico tiene un papel relevante. Para suplir las pérdidas que se producen cuando el sustrato se calienta a más de 400°C se necesita tener una sobrepresión de átomos de As. Si no se usa el flujo suficiente, los átomos de galio se irán agrupando formando pequeñas concentraciones esféricas que cambiarán completamente las características ópticas y eléctricas de las capas de semiconductor crecidas. Sobre el desorden que se produce en la red cristalina a diferentes flujos y diferentes temperaturas del sustrato se puede leer la referencia [Van Hove et al., 1983]. Estos cambios estructurales producen una reducción en la eficiencia que hace que la célula no sea útil para su estudio/uso. No hay límite en el flujo de As que puede ser usado en un crecimiento MBE, sin embargo, existen dos motivos para usar el mínimo flujo posible. El primero, de carácter económico, es el alto coste que presenta el arsénico de alta pureza. El segundo es que el uso de un menor flujo permite que la superficie se temple y se nivele de forma más rápida.

El propósito de este experimento es encontrar el mínimo flujo de arsénico necesario para conseguir un crecimiento de calidad a una temperatura del sustrato de 570°C. Para ello se va a ir reduciendo el flujo de As de forma progresiva, y se estudiarán las imágenes de los patrones RHEED obtenidas a diferentes flujos, viendo como influye su variación en los cambios producidos en los patrones. La aparición de líneas intermedias en los patrones de crecimiento indica que se ha llegado a un flujo de arsénico que no permite un crecimiento epitaxial de calidad.

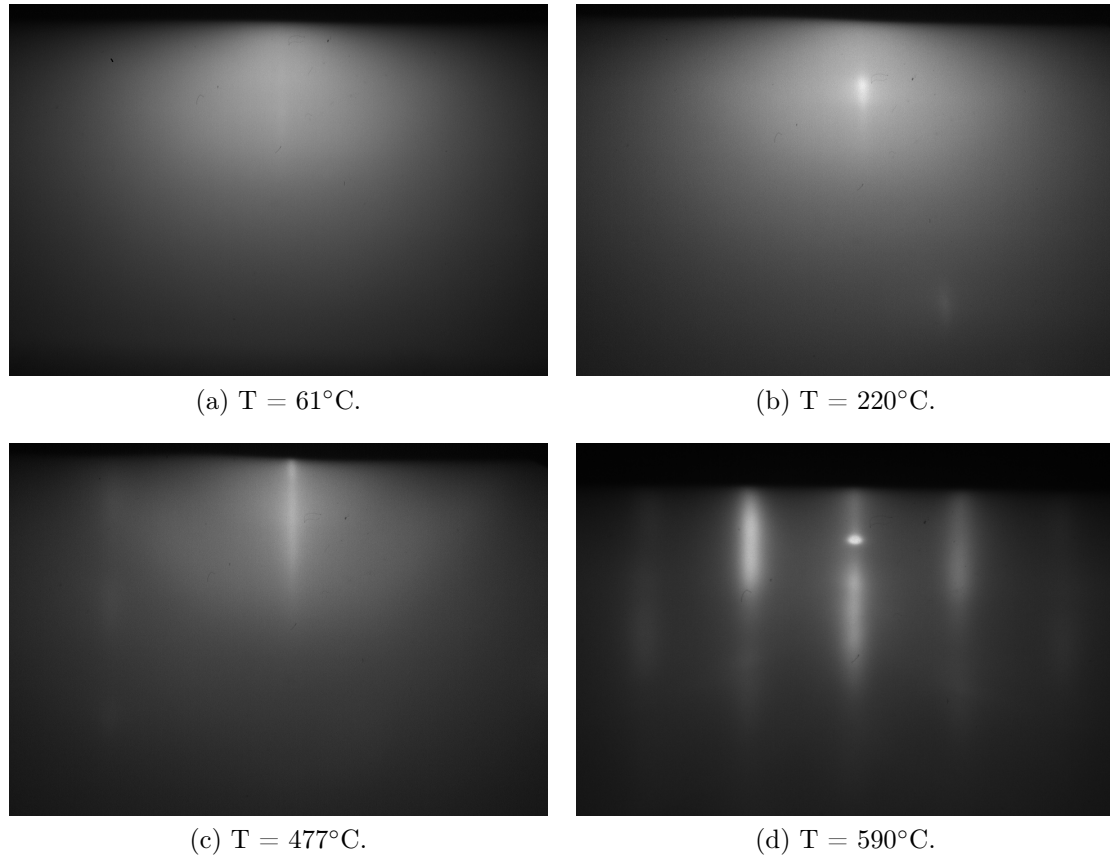


Figura 5.5: Imágenes capturadas de la pantalla del RHEED a diferentes temperaturas de una oblea de GaAs durante su proceso de desoxidación.

En la Figura 5.6 se incluyen tres imágenes de un crecimiento de una oblea de GaAs donde se ha ido reduciendo el flujo de arsénico progresivamente. La Figura 5.6a presenta un patrón de crecimiento normal. A medida que se el flujo de arsénico va disminuyendo se observa un nuevo patrón (Figura 5.6b) en la pantalla; entre la línea central y las secundarias en vez de haber 1 línea intermedia aparecen 2 líneas de menos intensidad equiespaciadas. Una reducción aún más grande del flujo presenta un tercer patrón donde la estructura cristalina que está siendo crecida presenta una alta degradación (Figura 5.6c). Este patrón añade una tercera línea entre la principal y las secundarias.

Para facilitar la búsqueda de los cambios de patrones se ha utilizado la herramienta Create Video, ya que el visionado de un vídeo agiliza mucho el proceso de su identificación. Los resultados determinan que para una temperatura del sustrato de 570°C , el flujo de As debe tener una relación de aproximadamente 1,7:1 respecto al flujo de Ga. A partir de aquí será función del crecedor el elegir un valor algo superior a éste para cubrir cualquier posible complicación. Se recuerda que en el primer punto de este capítulo se ha establecido una relación entre el flujo

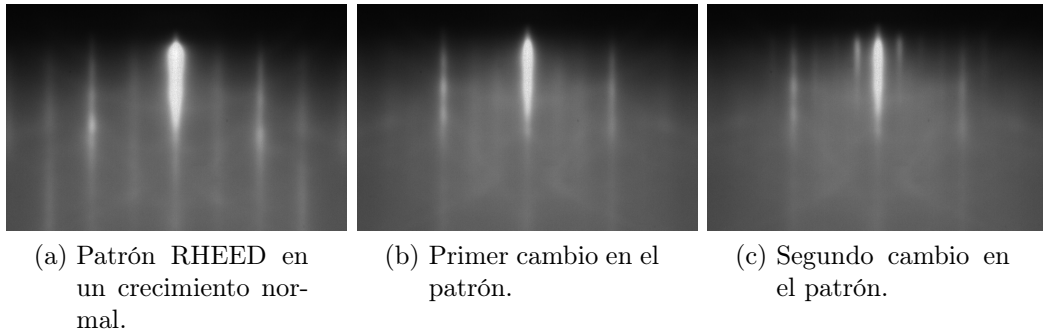


Figura 5.6: Imágenes capturadas mostrando la evolución de los patrones con la reducción del flujo de arsénico.

de Galio y la velocidad de crecimiento. Unido a los resultados obtenidos en este punto, el usuario ya tiene suficiente información para, dado un grosor objetivo de crecimiento, ajustar los flujos (temperaturas) de los elementos para que sea llevado a cabo en un tiempo determinado.

En los procesos de crecimiento no siempre es posible obtener unas imágenes tan claras como las mostradas en la Figura 5.6; muchas veces las líneas intermedias serán inapreciables. De hecho, cuando estos patrones son apreciables de una forma tan nítida, significa que el flujo de arsénico lleva un tiempo por debajo del mínimo requerido y ha podido suponer un deterioro de la calidad del material crecido, y por la tanto su invalidez para el estudio. Para conseguir un mejor ajuste del flujo y la automatización a tiempo real del proceso de medida se puede hacer uso del gráfico de intensidades del programa ‘Rheed capture’ (para ver el gráfico volver a mirar la sección 4.2.1). En este gráfico se va pintando a lo largo del tiempo la intensidad de la región que ha sido seleccionada sobre la imagen que recoge la cámara. Eligiendo un pequeño área de la zona donde aparecen las líneas intermedias se puede ir observando la variación de intensidad y, de este modo, detectar antes de que el ojo humano sea capaz de apreciarlo cuando se ha alcanzado un valor a partir del cual se empieza a poner en peligro la validez del crecimiento.

5.4. Crecimiento de puntos cuánticos

En los ejemplos vistos hasta ahora, se han tratado crecimientos por MBE de monocapas de un solo material (fundamentalmente GaAs). Una de las principales razones por las que se adquirió el reactor MBE fue dotar al IES con la capacidad de fabricación de IBSC. Una de las técnicas de fabricación de este tipo de células consiste en introducir puntos cuánticos en el material absorbente de luz [Marti et al., 2000].

5. Experimentación y resultados

Los puntos cuánticos son agrupaciones de átomos (desde unas centenas a unos millares) de un semiconductor embebidos en otro material semiconductor. El proceso típico por el cual se forman en un crecimiento MBE se denomina crecimiento de Stranski–Krastanov. Este proceso, que fue descubierto por Ivan Stranski y Lyubomir Krastanov en 1938, se presenta al crecer un material sobre otro con distinta constante de red. Se produce así una acumulación de energía elástica sobre el material que está siendo crecido y, cuando alcanza una cierta altura, la tensión se libera formando pequeñas islas atómicas. La organización, densidad y tamaño de las islas presentes en un sustrato tienen una relación directa en sus propiedades electrónicas y optoelectrónicas (entre ellas el band-gap). Siendo capaz de controlar el tamaño y composición de los puntos cuánticos, se pueden modificar sus propiedades optoelectrónicas de acuerdo a las necesidades requeridas. Hay disponible una extensa información en la literatura para el lector que esté interesado en una lectura más profunda sobre el crecimiento de puntos cuánticos por MBE.

La evolución de la formación de islas en las transiciones Stranski–Krastanov (SK) puede ser caracterizada mediante el uso de RHEED. El patrón de difracción de electrones cambia de líneas a puntos cuando la tensión acumulada en el material que se está creciendo hace que éste se reorganice en pequeñas islas [Nabetani et al., 1994]. En este experimento se va a realizar un crecimiento sobre un sustrato de GaAs para intentar monitorizar la formación de dichas islas. El proceso consta de tres partes; primero se va a crecer un cierto espesor del semiconductor principal, GaAs. Una vez alcanzado el espesor previsto, se abre la válvula de indio para formar islas de InGaAs. Tras un pequeño tiempo, se cierra la válvula de indio y se continua con un crecimiento normal de GaAs. El experimento se graba con una tasa de captura de 60 fps que permite apreciar de forma nítida los cambios que se producen en las transiciones. Ya que es uno de los primeros crecimientos de puntos cuánticos que se realizan en el IES, el objetivo será en caso de éxito la familiarización y el estudio de las imágenes producidas por un crecimiento de puntos cuánticos.

En el momento presente, el IES no dispone de la tecnología disponible para la medida del tamaño y densidad por superficie de puntos cuánticos. En diferentes ocasiones se ha encargado a otras instituciones dicha medida para células de puntos cuánticos no crecidas en el IES. Cuando se disponga en el centro de la tecnología necesaria o se reciban mediciones de las muestras crecidas, se intentará también establecer una relación entre los flujos de galio, arsénico e indio y el tamaño de las islas formadas. En la Tabla 5.2 se indican las temperaturas establecidas para el experimento.

En la Figura 5.7 se presentan tres imágenes RHEED adquiridas durante el experimento. La Figura 5.7a muestra el patrón que se presenta durante la primera fase del crecimiento de GaAs. Las otras dos figuras corresponden a diferentes etapas durante el proceso de creación de islas. La Figura 5.7b es la etapa de transición entre la formación de capas finas y la formación de islas. En el patrón se puede

Tabla 5.2: Temperaturas del sustrato y celdas de In, Ga y As fijadas para el experimento.

	Temperatura [°C]
Celda galio (punta)	1071
Celda galio (base)	950
As cracker	1000
As base	600
Celda arsénico	373
Celda indio	970
Sustrato	576

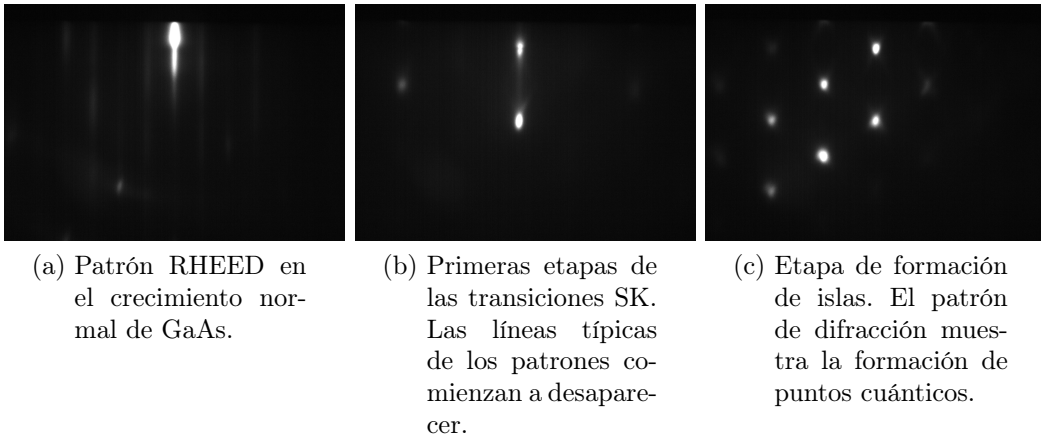


Figura 5.7: Imágenes capturadas mostrando la evolución de formación de islas de InGaAs.

apreciar una pérdida de intensidad en las líneas típicas de un crecimiento de GaAs y el comienzo de formación de alguna pequeña isla. En la Figura 5.7c el proceso se encuentra íntegramente en la etapa de formación de islas; la difracción que sufren los electrones se manifiesta como un patrón de puntos repartidos por la superficie.

Prototipo

En este capítulo se va a presentar de forma detallada un caso de uso del software desarrollado. En concreto, se describen los pasos seguidos para realizar el experimento presentado en la sección 5.1. No obstante, la primera parte del manual, esto es, la adquisición y grabación de imágenes, es común para todos los ejemplos de aplicación propuestos en el Capítulo 5 y cualquier otro análisis que se quiera realizar.

6.1. Uso de ‘Rheed capture’

Una vez que el experimento está en marcha y el reactor está funcionando se abre el programa Rheed capture para la adquisición de imágenes. En la pantalla principal se deben configurar los parámetros con los que se iniciará el proceso de captura de imágenes. En la Figura 6.1 aparece la zona del programa donde están situados los parámetros a configurar: bits por píxel, frames por segundo y ganancia. Para este ejemplo se va a usar una tasa de muestreo de imágenes de 40 fps. Como ya se calculó en la Sección 4.2.1, para una tasa de 40 fps se puede usar cualquier profundidad de color. Para conseguir la mayor exactitud se escoge el valor más alto que en este caso son 12 bits por píxel (este valor ofrece un rango de 2048 colores entre el negro y el blanco). Por último la ganancia se va a dejar al mínimo posible para que la distorsión de colores sea lo menor posible. Una vez configurados estos parámetros se iniciará el programa y se comenzará a observar en la pantalla principal del panel frontal las imágenes provenientes del detector fotoluminiscente del RHEED.

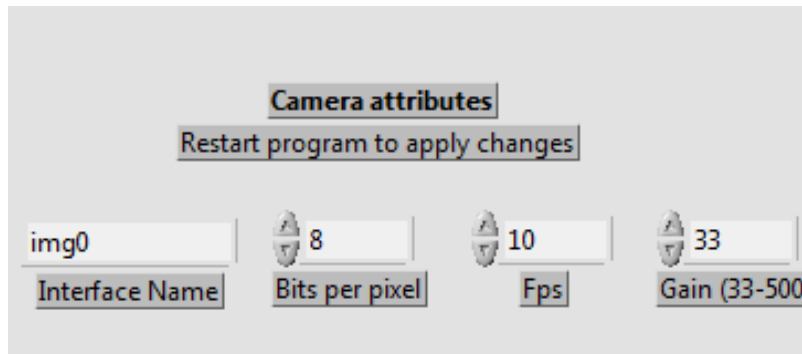


Figura 6.1: Opciones de configuración de la sesión de captura.

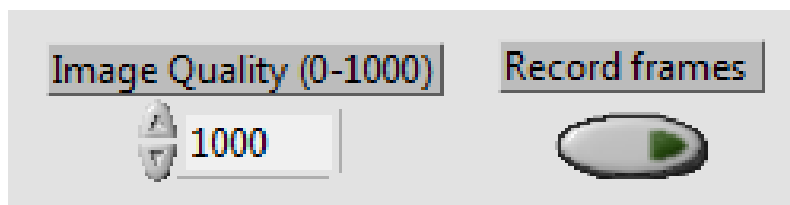


Figura 6.2: Zona de configuración de la grabación de imágenes. A la izquierda la calidad de la imagen, a la derecha el botón para comenzar y detener la grabación.

6.1.1. Grabación de imágenes

El programa ya está listo para empezar a grabar imágenes a la memoria del ordenador. Antes de empezar la grabación el usuario deberá escoger la calidad de las imágenes que van a ser grabadas. El programa permite escoger desde una compresión de imagen con muchas pérdidas (valor 0), a una compresión sin pérdidas (valor 1000). Se va a dejar el valor predeterminado de 1000 para intentar mantener con la mayor fidelidad posible los colores de la imagen original. El usuario también deberá elegir el área de la imagen que va a ser grabada. Para ello situará el ratón sobre la pantalla principal y dibujará un recuadro marcando el área de interés. Se podrá repetir la operación de elección de área tantas veces como se quiera antes de pulsar el botón de grabación, pero una vez comenzada la grabación esta ventana no se podrá modificar. Si el usuario quiere grabar la imagen entera no seleccionará ningún área y se pulsará directamente el botón de grabación. En nuestro caso se va a grabar la imagen entera para que sirva para diferentes estudios. La Figura 6.2 muestra el campo para seleccionar la calidad de la imagen grabada y el botón de comienzo y fin de grabación. El botón de grabación encenderá una luz verde durante la grabación hasta que vuelva a ser pulsado.

Las imágenes se van grabando en una carpeta que contiene la fecha y hora a la que se ha comenzado la grabación. Además contiene en el nombre los fps y los bpp con los que se inició la sesión de captura para que quede constancia del valor de estos parámetros, ya que son de suma importancia a la hora de realizar cualquier

estudio.

6.2. Uso de MLRC

Una vez que se dispone de las imágenes se abrirá el software MLRC para su estudio. En la Figura 4.13 de la Sección 4.2.3 se presentó la interfaz gráfica del programa de análisis MLRC. En ella se observa el área *Initial Data* en el que se dispone de diferentes tipos de datos de entrada: imágenes (*Load Images*), vídeo (*Load Video*) o datos (*Load Data*). En este ejemplo se detalla el procedimiento normal de análisis a partir de las imágenes obtenidas por el programa *Rheed capture*. El segundo método de entrada de datos permite el análisis partiendo de un vídeo creado con un conjunto de imágenes, lo que conlleva un ahorro de espacio a la hora de su almacenaje pero produce una pequeña pérdida en la calidad de las mismas. Por último, el programa permite la carga directa de los datos almacenados de un análisis previo de un conjunto de imágenes, ahorrando un gran cálculo computacional pero limitándose a un estudio específico ya realizado.

Antes de cargar las imágenes se tendrá que decidir si se va a hacer un análisis de toda la imagen o de una región específica. Si las imágenes grabadas son del área específica que se quiere estudiar se podrá desmarcar la opción *Fine Tuning* del campo *Properties*, si no, se dejará marcada esta opción. En general, es recomendable dejar esta opción marcada, ya que, aunque luego se decida hacer el estudio de toda la imagen, se podrá seleccionar como región la imagen entera. Los valores bajo el campo *ROI* delimitan el tamaño y posición inicial de la ventana de estudio. Ésta se podrá posteriormente ajustar sobre la imagen. Si no se precisa realizar un estudio con una ventana igual a la usada en otro estudio para el mismo enfoque de cámara, se dejarán los valores predeterminados para su posterior ajuste.

6.2.1. Selección de archivos

Cuando se pulsa el botón para la carga de imágenes, aparecerá una ventana con el objetivo de seleccionar la carpeta donde se encuentran ubicadas. Es importante fijarse dentro del nombre de la carpeta elegida en los fps que indique, ya que éste será un parámetro fundamental que se necesitará configurar a la hora de realizar el estudio. En la Figura 6.3 se observan varias carpetas con diferentes frecuencias de grabaciones. En este caso, como ya se comentó a la hora de hacer la captura, se eligió una frecuencia de muestreo de 40fps.

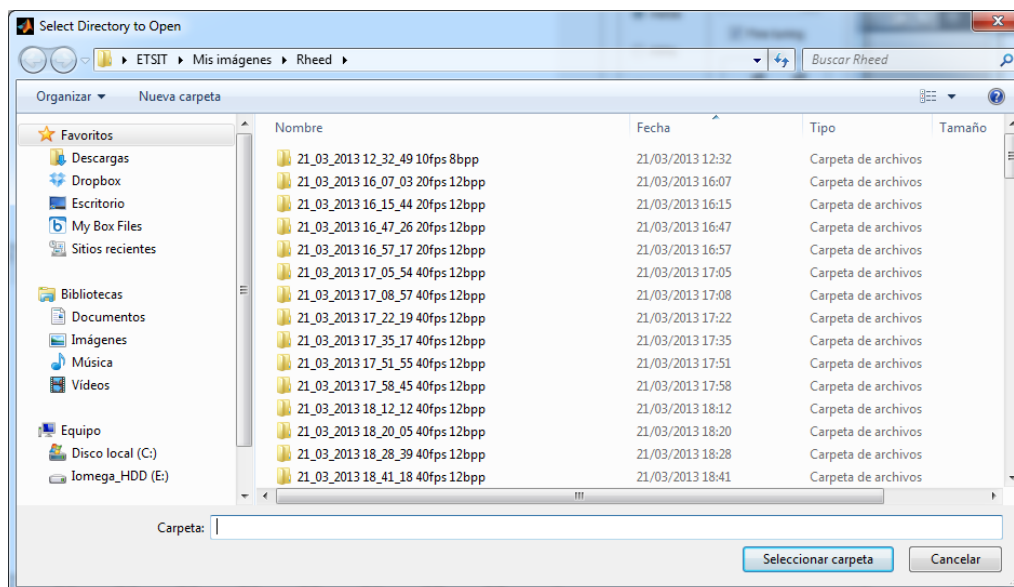


Figura 6.3: Ventana de selección de la carpeta contenedora de las imágenes a estudiar.

6.2.2. Selección del área de estudio y análisis de intensidades

Una vez seleccionada una carpeta válida, el programa mostrará una vista en miniatura de todas las imágenes y pedirá que se seleccione una imagen para definir la ventana de estudio. Cuando la imagen sea seleccionada, un aviso indicará que debe ajustarse la ROI. En la Figura 6.4 se presenta la pantalla de selección de la región de interés; la ventana ha sido ajustada para coger el punto de reflexión especular. En el encabezado de la imagen se muestran las coordenadas de la ventana de selección. Al clicar dos veces sobre la ventana de estudio se iniciará un análisis que llevará un tiempo que variará dependiendo del número de imágenes y el tamaño de la ventana de estudio. Se puede ver en la parte inferior derecha el estado del programa, que podrá ser o bien ocioso (*idle*) o bien ocupado (*busy*).

Cuando el programa haya terminado de realizar el primer análisis de intensidad se mostrará el resultado en el gráfico superior de la interfaz y aparecerá un nuevo cuadro con opciones para la gestión de los datos (ver Figura 6.5). Así mismo, habrá aparecido un botón para salvar los datos del gráfico superior que los almacenará en ficheros con extensiones ‘.mat’ y ‘.csv’.

6.2.3. Ajuste de rango temporal de estudio

En la curva se pueden observar durante un período de tiempo unas oscilaciones que se van atenuando hasta alcanzar un valor más o menos constante. Ése es el período que se necesita analizar y para ello se debe acotar el rango de estudio de

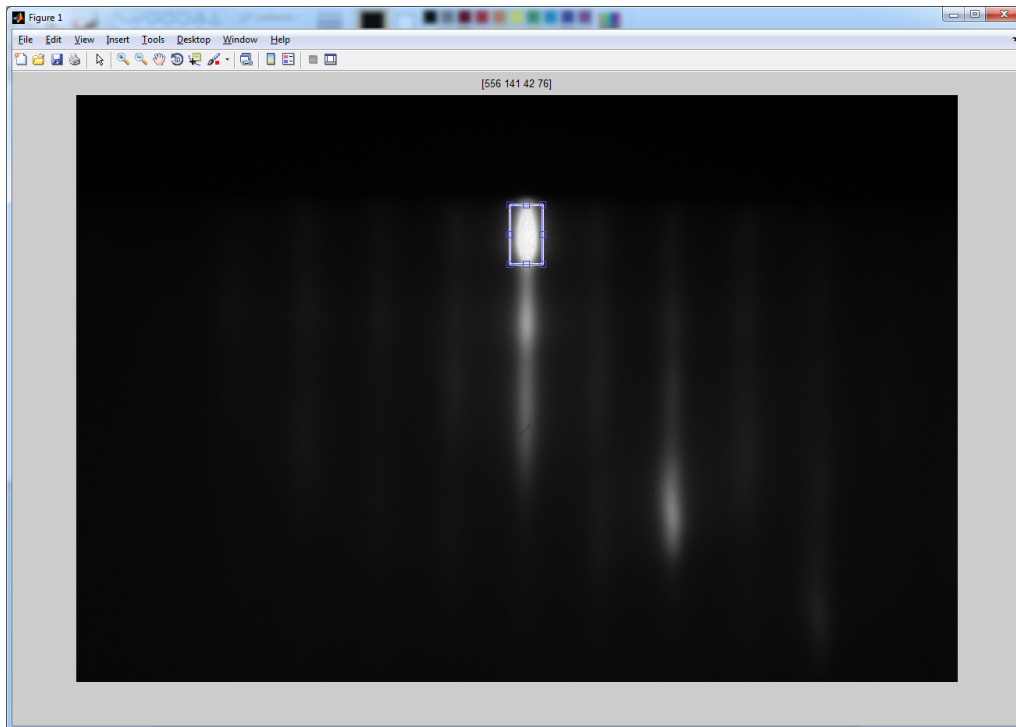


Figura 6.4: Pantalla de selección de la ventana de estudio.

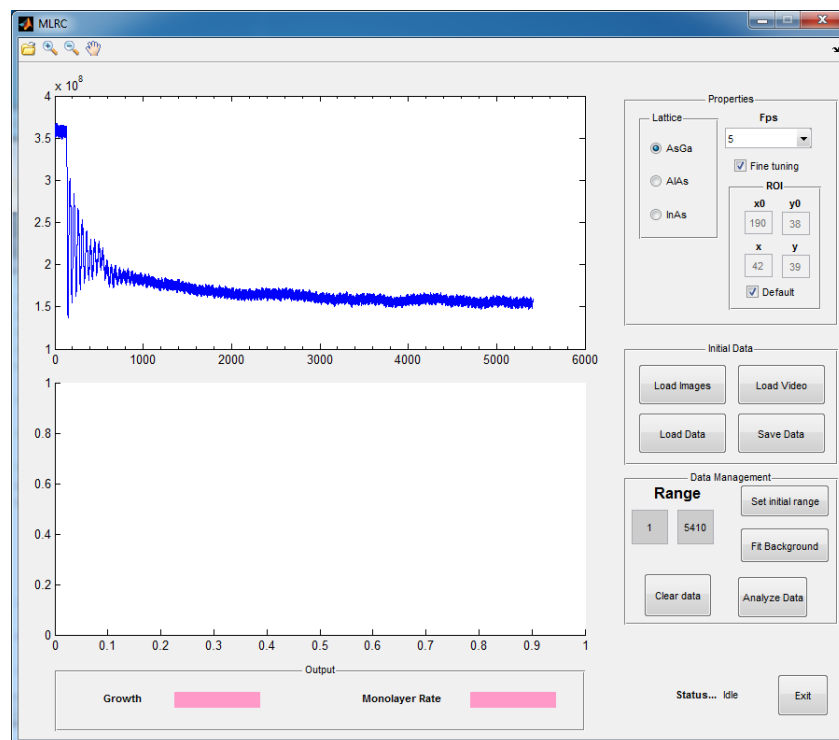


Figura 6.5: Obtención de la curva de análisis de intensidades.

modo que los valores de inicio y fin caigan dentro de él. Seguidamente, se rellenará el campo *Range* del cuadro *Data Management* con los valores inicial y final estimados y se pulsará el botón *Fit Background*. Se puede entonces observar en el gráfico inferior el rango temporal que se va estudiar (ver Figura 6.6). Si se quiere seguir ajustando el rango, se volverán a colocar los nuevos valores en los campos de inicio y fin de *Range* y se volverá a pulsar el botón *Fit Background* para actualizar el rango de estudio. Si alguno de los valores del rango introducidos cae fuera de los valores máximo y mínimo o se deja en blanco, el programa marcará el campo en color rojo indicando que se ha cometido un error.

6.2.4. Análisis y presentación de resultados

Una vez ajustado el rango temporal de estudio se procederá a fijar los valores de los parámetros *Fps* y *Lattice*. El primero se corresponde con el valor que se anotó previamente a la hora de seleccionar la carpeta con las imágenes. El segundo, es el tipo de red cristalina que está siendo crecida (en este caso dejamos la opción por defecto de GaAs). Pulsando el botón *Analyze Data* comenzará el análisis de la tasa de crecimiento de monocapas y tras un pequeño tiempo el programa mostrará en la gráfica inferior en color rojo la señal estimada superpuesta sobre la señal original¹. En el cuadro de información *Output* se mostrarán los resultados del crecimiento en nanómetros por hora y monocapas por segundo. Se puede variar varias veces el rango para hacer distintos análisis y ver que el resultado se mantiene dentro de un margen de error inferior al 1,5 %.

¹La señal no es exactamente la original, sino la señal filtrada. Se puede ver como es una señal mucho más suave debido a la eliminación de parte del ruido.

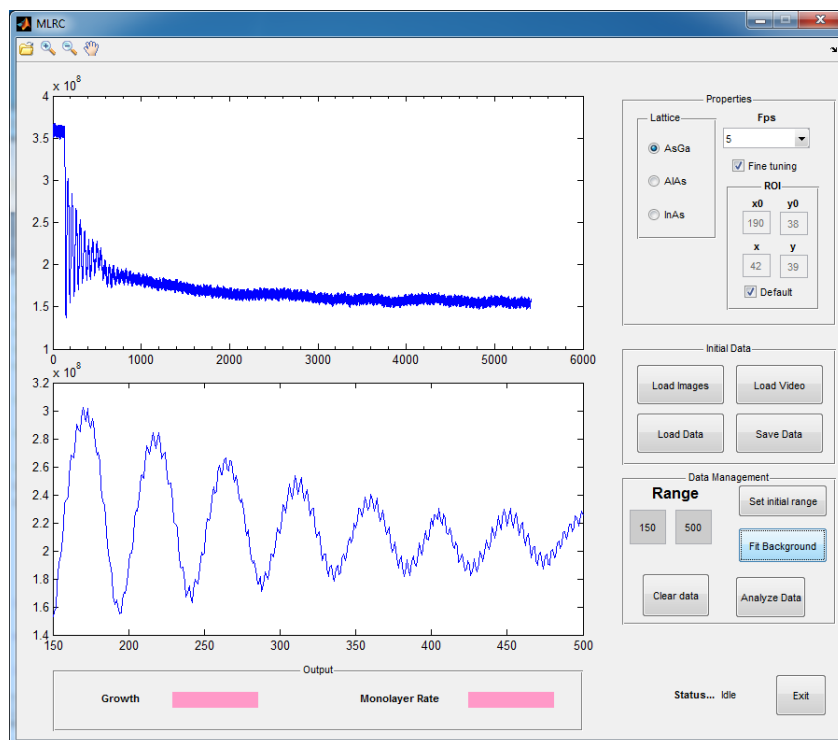


Figura 6.6: El gráfico inferior muestra la señal original en el rango temporal que se ha elegido para el estudio.

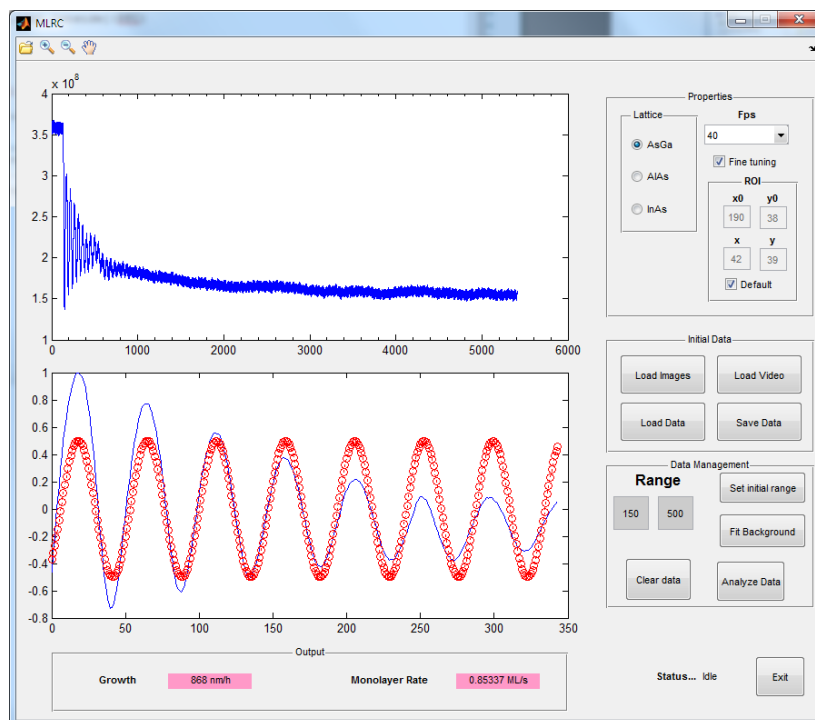


Figura 6.7: El gráfico inferior muestra la superposición de la señal estimada en rojo sobre la señal original en azul. Los resultados son presentados en el recuadro inferior.

Conclusiones y futuros trabajos

7.1. Conclusiones

En este proyecto se ha desarrollado un sistema de adquisición y caracterización de imágenes RHEED. Este sistema sirve una importante función como herramienta de apoyo a las investigaciones que se realizan con un reactor MBE. La complejidad de un buen uso de un reactor MBE radica principalmente en una precisa calibración de varios parámetros fundamentales para realizar crecimientos de calidad de capas de semiconductores.

Cabe destacar que en el comienzo ha sido necesario familiarizarse con diferentes tecnologías totalmente desconocidas. Entre ellas se encuentran la física de los reactores MBE, el funcionamiento y crecimiento de células solares en general, y más específicamente las de banda intermedia, el funcionamiento de los sistemas RHEED y la programación en el entorno Labview. Después de una primera fase de familiarización se pasó a la fase de estudio de requisitos y diseño del sistema.

El sistema de caracterización debía satisfacer diferentes necesidades del grupo de investigación. Por un lado, debía tener la capacidad de ser un sistema modular y abierto que permitiese estudios actuales y futuros que no son aportados en la actualidad por las principales soluciones comerciales. Esto se consiguió dotando al sistema de un equipo de adquisición de imágenes a alta velocidad y con una gran profundidad de color. Por otro, debía servir para la medida y el ajuste de los principales factores que intervienen en un crecimiento MBE. Para cumplir con dicho objetivo se desarrolló un software de medición de la tasa de crecimiento de capas monocristalinas y se hicieron varios experimentos en laboratorio para el estudio de imágenes y la optimización de parámetros.

Se han desarrollado los programas *Rheed Capture* y *Create Video* en Labview para realizar la adquisición, almacenado y creación de vídeos comprimido de las

7. Conclusiones y futuros trabajos

imágenes del RHEED. El comienzo del desarrollo de estos programas supuso la dificultad inicial del aprendizaje de un nuevo lenguaje de programación como Labview y la adaptación a un pensamiento diferente a la hora del diseño estructural del programa.

Se ha desarrollado el programa *MLRC* en Matlab que permite el cálculo de la tasa de crecimiento en un reactor MBE a partir de imágenes, vídeo o datos previamente guardados. En el desarrollo del programa se aplicaron conceptos con los que se trabajó durante la carrera de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación como son la densidad espectral de potencia, la aplicación de filtros paso bajo, la aplicación de filtros de imagen, diversos conceptos de teoría de la señal y la aplicación de funciones de riesgo como el error cuadrático medio.

La fase de aplicación del sistema consistió en la realización de diversos experimentos de los cuales se han plasmado en la memoria los más interesantes y satisfactorios. Se han alcanzado muy buenos resultados en uno de los objetivos principales como es la medida de la tasa de depósito, permitiendo establecer una relación bastante precisa entre los flujos de As y Ga y dicha tasa. La estimación realizada ha tenido un error del orden del 1.6 %, por debajo del requisito inicial del 4 %. Además se ha concluido que las obleas idóneas a la hora de la calibración para medir la velocidad del crecimiento tienen un tamaño menor (10x10 mm) al tamaño estándar de las obleas de crecimiento.

Se han definido los patrones correspondientes al estado de desoxidación de una oblea de GaAs a diferentes temperaturas y cuantificado la temperatura y el tiempo necesarios para su desoxidación bajo unas condiciones específicas. También se han identificado los diferentes patrones que aparecen a la hora de no disponer de suficiente arsénico en la cámara, permitiendo la medida del mínimo de flujo de arsénico necesario a una temperatura dada que no empobrezca la calidad del crecimiento.

Se han obtenido imágenes de la formación de puntos cuánticos en sus diferentes etapas de formación dentro de un crecimiento de células solares de banda intermedia. Esto supone la base para un futuro estudio de la relación de sus características morfológicas y sus características optoelectrónicas.

Se ha desarrollado de forma detallada un ejemplo de un caso de uso con el objetivo de facilitar a futuros usuarios del reactor la utilización del sistema. El trabajo realizado supone un avance como base de un futuro perfeccionamiento en el manejo del reactor y sus posteriores estudios.

Finalmente, el desarrollo de este proyecto ha supuesto para el alumno aplicar de forma práctica diferentes conocimientos adquiridos durante su etapa de formación; pero también le ha servido para adquirir conocimiento en campos nuevos y entrar de lleno en contacto con el trabajo que se desarrolla en un centro público de

investigación de renombre.

7.2. Futuros trabajos

En esta sección se presentan algunas ideas como posibles líneas de continuación de la investigación.

7.2.1. Medida de la tasa de depósito en tiempo real

Este sistema ha sido principalmente desarrollado para el estudio de imágenes previamente adquiridas. Durante una de las últimas fases de su desarrollo se planteó la posibilidad de conseguir una medida de la tasa de crecimiento en tiempo real. Por este motivo – entre otros – se situó en el panel frontal un gráfico que mostraba la intensidad de la región de interés seleccionada en la pantalla. Para llevar a cabo el análisis a tiempo real en Labview se necesita trasladar el código desarrollado en Matlab a bloques VI de Labview, y además, comprobar si el equipo dispone de la potencia de cálculo necesaria para capturar, analizar, mostrar y guardar todos estos datos a altas velocidades de captura.

Más aún, si lo anterior fuese posible, se podría llegar a considerar también la medida de la tasa de crecimiento, no sólo ya en experimentos de calibración, sino en crecimientos reales de producción. Esto, sin embargo, presenta muchos más problemas que la medida en un experimento de calibración. Debido a que las oscilaciones se atenúan con el tiempo, en un crecimiento donde no se cierran las válvulas de los materiales para permitir una nivelación de estas capas, la variación de amplitud de las oscilaciones sería un valor muy pequeño que, a priori, no se sabe si podría distinguirse del ruido de la medida. Además, para un experimento de calibración, el substrato debe estar en condiciones de parado, para estar adquiriendo imágenes desde el mismo ángulo. En un crecimiento normal esta situación no es aceptable, ya que produce una reconstrucción de la superficie no homogénea (se han llegado a medir diferencias de hasta un 6 % en [Anselm, 2012]). Para resolver este problema, se podría ajustar la velocidad del giro del reactor forzando que a determinados tiempos de captura la dirección reflejada sea la misma. Sin embargo, para obtener suficientes imágenes que permitan realizar el estudio, la oblea debería girar a varios cientos de revoluciones por minuto; algo que por ahora, con los reactores actuales, está fuera de alcance.

7.2.2. Reconstrucción en 2D y 3D de la oblea

En varias secciones se han visto los patrones que forma la reflexión de los electrones en la pantalla del RHEED. Estos patrones, como ya se comentó, dependen de la morfología de la superficie. El patrón que se ha visto principalmente en este trabajo ha sido el de la dirección [001]. Sin embargo, rotando la oblea a diferentes ángulos, se observan otros patrones de crecimiento distintos que se dan en otras direcciones de la red cristalina.

Se podría estudiar la viabilidad de que, obteniendo suficientes frames por segundo de cada dirección de la red, se pudiese establecer una relación entre patrones y superficie a nivel atómico y hacer una reconstrucción digital en dos dimensiones de la superficie de la oblea. Incluso, si el programa llevase la cuenta de la cantidad de material depositado, generar una reconstrucción en tres dimensiones capa a capa que ayudase a un mejor estudio de las características de la célula crecida. Descartar posibles errores en cada uno de los estados (crecimiento, metalización, etc) del proceso de creación de una célula ahorra mucho tiempo cuando los resultados a la hora de medirlas no son los esperados.

7.2.3. Automatización de la medida de puntos cuánticos

En la sección 5.4 se completó un experimento de formación de puntos cuánticos en una oblea de GaAs. Durante la realización de este trabajo no se dispuso en el centro de ningún aparato que permitiese la medida de su diámetro y altura. Se propone la creación de un programa para la automatización de la medida de puntos cuánticos que ahorre el coste de adquisición de un equipo de medida. Para ello se necesitará disponer de mediciones de diferentes muestras crecidas en el centro bajo diferentes condiciones. Estas medidas se encargarían a otra institución durante el período de calibración.

Conociendo su tamaño real y examinando el tamaño de los patrones que se forman en las imágenes RHEED, el programa podría establecer una relación directa que permitiese saber con un rápido estudio, el tamaño de los puntos crecidos. Esto permitiría establecer una rápida relación entre los flujos de los elementos, la temperatura del sustrato y el tamaño de los puntos cuánticos.

Presupuesto

En esta sección se detalla el presupuesto del proyecto realizado, especificando los gastos de personal, software y hardware que han sido generados durante el desarrollo.

Coste de personal

Aunque la carga de trabajo no ha sido constante debido a los tiempos de retraso tanto de la recepción del material como de la ejecución de experimentos se puede establecer una media que se aproxima a las horas reales dedicadas. El coste de personal asciende a la cantidad de 18195 €. El desglose del coste de personal se puede ver en la Tabla A.1.

Coste de licencias de software

Durante la elaboración del proyecto se han utilizado diferentes plataformas de desarrollo para generar el código de las distintas aplicaciones. El coste de las licencias asciende a 207 €y se desglosa en la tabla A.2.

Coste del hardware

Para el desarrollo del proyecto se han adquirido varios elementos para formar el sistema. El coste de todas las adquisiciones hardware asciende a 4082 €y se desglosa en la Tabla A.3.

Coste de material fungible

Entre los costes de material fungible se incluyen elementos como la tinta de impresión, obleas y materiales usados en los crecimientos, potencia consumida de los equipos utilizados (Pc, reactor MBE), etc. Se ha aproximado este gasto a 250 €.

Resumen de costes

En la tabla A.4 se dispone un resumen de los costes parciales que, sumados a los costes indirectos, y una vez aplicado el IVA da como resultado el precio total del proyecto. El coste total asciende a 28696.78 €.

Tabla A.1: Coste de personal.

Puesto	N de horas	Coste por hora	Total [€]
Analista	145	33	4785
Diseñador	120	33	3960
Programador	330	25	8250
Responsable de documentación	80	15	1200
			18195 €

Tabla A.2: Coste de licencias de software.

Licencia	Coste [€]
Matlab Student R2012	70
Labview 2012	137
207 €	

Tabla A.3: Coste del hardware.

	Coste [€]
PC	650
Tarjeta capturadora NI PCIe-1433	1998
Cámara Basler acA2000-340km	1090
Alimentador para cámara	66
Objetivo Pentax	163
Pieza inicial de soporte	90
Trípode	25
4082 €	

Tabla A.4: Coste total.

Licencia	Coste [€]
Personal	18.048
Coste del hardware	4082
Costes del Software	207
Costes de material fungible	250
Total	22587 €
Costes indirectos (5 %)	1129.35
Total	23716.35 €
IVA (21 %)	4980,43
TOTAL	28696.78 €

Bibliografía

- A. Anselm. An introduction to mbe growth. <http://lase.ece.utexas.edu/mbe.php>, 2012. último acceso 2 de Marzo de 2015.
- M. R. Brozel and G. E. Stillman. *Properties of Gallium Arsenide*. INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- A. Y. Cho. Morphology of epitaxial growth of gaas by a molecular beam method: the observation of surface structures. *Journal of Applied Physics*, 41(7):2780–2786, 1970.
- A. Y. Cho and J. R. Arthur. Molecular beam epitaxy. *Prog. Solid State Chemistry*, 10(3):157–191, 1975.
- P. J. Dobson, N. G. Norton, J. H. Neave, and B. A. Joyce. Temporal intensity variations in rheed patterns during film growth of gaas by mbe. *Vacuum*, 33(10-12):593–596, 1983.
- C. M. H. Driscoll, A. F. W. Willoughby, J. B. Mullin, and B. W. Straughan. Precision lattice parameter measurements on doped gallium arsenide and related compounds. *Inst. Phys. Conf. Series*, 24:275, 1975.
- J. H. Gilmer. Transients in the rate of crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 49:465–474, 1980.
- J. Grange. *The Growth of MBE III-V Compounds and Alloys*. Plenum, 1985.
- A. Luque and A. Martí. Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels. *Physical Review Letters*, 78(26):5014–5017, 1997.
- A. Luque and A. Martí. A metallic intermediate band high efficiency solar cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(2):73–86, 2001.
- A. Martí, L. Cuadra, and A. Luque. Quantum dot intermediate band solar cell. *28th Photovoltaic Specialists Conference*, pages 940–943, 2000.
- S. Martini and A. A. Quivy. In-situ determination of indium segregation in ingaas/gaas quantum wells grown by molecular beam epitaxy. *Brazilian Journal of Physics*, 32, 2001.

- A. Martí, L. Cuadra, and A. Luque. Partial filling of a quantum dot intermediate band for solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(10):2394–2399, 2001.
- Y. Nabetani, T. Ishikawa, S. Noda, and A. Sasak. Initial growth stage and optical properties of a three-dimensional inas structure on gaas. *Journal of Applied Physics*, 76:347–351, 1994.
- J. H. Neave, B. A. Joyce, P. J. Dobson, and N. G. Norton. Dynamics of film growth of gaas by mbe from rheed observations. *Applied Physics A*, 31:1–8, 1983.
- K. F. Renk. *Basis of Laser Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- Sector7. Lattice constants and crystal structures of semiconductors. http://7id.xray.aps.anl.gov/calculators/crystal_lattice_parameters.html, 2015. último acceso 2 de Marzo de 2015.
- J. M. Van Hove, P. I. Cohen, and C. S. Lent. Disorder on gaas(001) surfaces prepared by molecular beam epitaxy. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1(2):546–550, 1983.
- J. D. Weeks and G. H. Gilmer. Dynamics of crystal growth. *Advances in Chemical Physics*, 40:157, 1979.
- G. Zhou and M. Borek. Manufacturing efficiency improvement through mbe recipe optimization. *International conference on compound semiconductor manufacturing technology*, 2012.